ÜBER DEN EINFLUSS ALLSEITIGEN DRUCKES
AUF DAS
MAGNETISCHE MOMENT VON EISEN, NICKEL U. NICKELSTAHL.

INAUGURAL-DISSERTATION

DER

HOHEN PHILOSOPHISCHEN FAKULTÄT (II. SEKTION)

DER

KÖNIGLICHEN LUDWIG-MAXIMILIANS-UNIVERSITÄT
ZU MÜNCHEN

ZUR

ERLANGUNG DER DOKTORWÜRDE

VORGELEGT AM 21. MAI 1909

VON

GERHARD FREIHERR DU PREL
AUS MÜNCHEN.

MÜNCHEN 1910
HANS SACHS-VERLAG (SCHMIDT-BERTSCH & HAIST).

ÜBER DEN EINFLUSS ALLSEITIGEN DRUCKES
AUF DAS
MAGNETISCHE MOMENT VON EISEN, NICKEL U. NICKELSTAHL.

INAUGURAL-DISSERTATION

DER

HOHEN PHILOSOPHISCHEN FAKULTÄT (II. SEKTION)

DER

KÖNIGLICHEN LUDWIG-MAXIMILIANS-UNIVERSITÄT
ZU MÜNCHEN

ZUR

ERLANGUNG DER DOKTORWÜRDE

ACAD.
LUDOVIC.
BIBL.

VORGELEGT AM 21. MAI 1909

VON

GERHARD FREIHERR DU PREL
AUS MÜNCHEN.

MÜNCHEN 1910
HANS SACHS-VERLAG (SCHMIDT-BERTSCH & HAIST).

INHALT.

Einleitung . . . . . Seite 5

I. Versuchsanordnung . . . . . Seite 7

A) Ringeinbau
B) Schaltung

II. Prüfung der Apparate und Gang eines Versuches . . . . . Seite 20

III. Korrektionen und Fehlerquellen . . . . Seite 27

IV. Ergebnisse . . . . . Seite 41

A) Eisen
B) Nickel
C) Nickelstahl

Zusammenfassung der Resultate . . . . . Seite 56

□ □ □

Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41548314_0076

EINLEITUNG.

So zahlreich und mannigfaltig die Versuche über den Einfluss von Zug, Druck oder Torsion auf die Magnetisierung von ferromagnetischen Metallen vorliegen, so spärlich sind in dieser Beziehung die Untersuchungen über allseitigen Druck.

Die ersten derartigen Experimente wurden von Wassmuth[1]) angestellt, der einen von einer Magnetisierungsspule umgebenen, in Quecksilber eingebetteten Eisenstab magnetometrisch untersuchte; durch Erwärmen des eingeschlossenen Quecksilbervolumens wurde der Eisenstab komprimiert. Trotz der geringen Drucke, etwa 10 Atmosphären, fand der Verfasser eine Aenderung des magnetischen Momentes und zwar mit wachsendem Drucke eine Abnahme, die jedoch bei höheren Feldstärken, nahe der Sättigung, in eine Zunahme überging.

Als zweiter stellte H. Tomlinson[2]) Untersuchungen dieser Art an, fand aber keinen merklichen Druckeinfluss. Nur der remanente Magnetismus wird nach ihm bei Beginn oder Aufhören des Druckes teilweise verringert.

Im Jahre 1898 erschien von H. Nagaoka und K. Honda[3]) eine grössere Abhandlung über Magnetostriktion, in welcher sie auch Untersuchungen über den Einfluss allseitigen Druckes anstellten. Durch Anwendung einer empfindlichen magnetometrischen Differentialmethode konnten sie den allseitigen Druckeinfluss auf die Magnetisierung von Eisen und Nickel bis zu 250 Atmosphären verfolgen. Sie beobachteten bei Eisen, wie Wassmuth, eine Abnahme des magnetischen Momentes mit wachsendem Drucke; nach ihren Versuchen ist bei Nickel,

[1]) A. Wassmuth, Wien. Ber. 86. p. 539—550. 1882.
[2]) H. Tomlinson, Proc. Roy. Soc. Lond. 42. p. 224—230. 1887.
[3]) H. Nagaoka und K. Honda. Phil. Mag. 46. p. 261 ff. 1898.

dessen Permeabilität durch allseitigen Druck vergrössert wird, nur eine Andeutung dafür vorhanden, dass bei höheren Feldstärken der Druckeinfluss wieder abnehmen könne, während sie bei Eisen ein monotones, allmählig asymptotisch verlaufendes, dem Drucke proportionales Steigen der Einwirkung von Flüssigkeitsdruck finden.

Endlich wären noch die Versuche von Frisbie[1]) in dieser Hinsicht anzuführen, welche eine ballistische Differentialmethode benützt und für geglühtes Eisen nur Zunahme des magnetischen Momentes, bei hartem Eisen zuerst Abnahme und von Feldstärke $H = 5$ *C. G. S.* an Zunahme durch allseitigen Druck findet. Der remanente Magnetismus wird bei Aufhebung oder Anwendung des Druckes verändert.

Zweck der vorliegenden Arbeit war es, eine möglichst sorgfältige und genaue Untersuchung über hydrostatischen Druckeinfluss auf das magnetische Moment von Eisen und Nickel anzustellen, um die teilweisen Widersprüche, in denen die eben genannten Arbeiten zu einanderstehen, tunlichst aufzuklären. Ferner wurde beschlossen, die Untersuchungen auch auf Nickelstahl auszudehnen, da dessen Verhalten in Bezug auf Volumenänderung durch Magnetisieren[2]) interessante Eigenschaften zeigt — grosse Abhängigkeit von der prozentualen Zusammensetzung der Legierung, bei bestimmten Nickelgehalte enorme Volumenänderung im Vergleich zu Eisen usw. —, sodass zu erwarten stand, auch bei den vorliegenden, sozusagen reziproken Experimenten interessante Ergebnisse zu erhalten.

[1]) F. C. Frisbie. Phys. Rev. 18. 1904. p. 432. ff.

[2]) vergl. darüber H. Nakaoka und K. Honda, Phil. Mag. 4. p. 45 ff. 1902. sowie H. Nagaoka u. K. Honda, Journ. Coll. of Science of Tokyo 19. Art. 11. 13 S. 1903. Math. and Phys. Soc. Tokyo 2. 9—15. 1903.

I. Versuchsanordnung.

In Anbetracht der nach den bisherigen Versuchen gefundenen äusserst kleinen Aenderungen des magnetischen Momentes durch allseitigen Druck musste eine besonders empfindliche Anordnung gewählt werden, sodass die einfachste Art der Untersuchung, Messung der Permeabilität unter Druck und ohne Druck eo ipso ausgeschlossen war.

Es lag der Gedanke nahe, eine magnetometrische oder ballistische Differentialmethode zu verwenden, da durch geeignete Wahl und Einstellung der Apparate gewiss eine sehr hohe Empfindlichkeit zu erreichen gewesen wäre.

Allein für erstere stand mir kein Druckzylinder aus unmagnetischem Materiale zur Verfügung, ausserdem setzt die hier nötige Verwendung von Ellipsoïden voraus, zwei grössere Stücke des zu untersuchenden Materiales zur Verfügung zu haben. Vorversuche mit einer ballistischen Differentialmethode, ähnlich der von Frisbie[1]) angewendeten, ergaben so bedeutende Abgleichungsschwierigkeiten in magnetischer Beziehung, dass die grossen Vorteile einer derartigen Anordnung durch die Unsicherheit der Resultate wieder wettgemacht worden wären.

Die ballistische Methode wurde daher in der Weise abgeändert, dass die Induktionsänderungen durch Aenderung des Druckes im konstanten Magnetfelde bewirkt wurden.

Nachdem ich mich durch orientierende Vorversuche überzeugt hatte, dass durch geeignete Dimensionen der Apparate, sowie durch ein genügend empfindliches Galvanometer selbst die kleinste Druckeinwirkung der Beobachtung zugänglich gemacht werden konnte, wurde mit dem Aufbau der experimentellen Anordnung begonnen.

A) Ringeinbau.

Da eine genügend rasche, für ballistische Zwecke brauchbare Druckänderung nur durch plötzliche Expansion herzu-

[1]) F. C. Frisbie l. c.

stellen war, so war darauf zu achten, ein tunlichst kleines Flüssigkeitsvolumen expandieren zu lassen. Daraus folgt aber die Notwendigkeit, möglichst kleine Materialstücke zu untersuchen. Hand in Hand damit geht eine notwendige Verfeinerung des Galvanometers, da ja dessen Ausschläge ceteris paribus direkt proportional dem Querschnitte des von der Sekundärspule eingeschlossenen ferromagnetischen Metalles sind. Andererseits ergibt sich aber auch aus den geringen Dimensionen der zu untersuchenden Körper eine später zu erörternde Annehmlichkeit.

Ich entschloss mich daher zur Verwendung von kleinen Toroïden, deren obere Durchmessergrenze durch die Dimensionen des Druckzylinders gegeben war.

Folgende Tabelle möge zur Orientierung über die Grösse und Bewicklung der Ringe dienen:

	innerer Durchmesser in cm	äusserer Durchmesser in cm	Höhe in cm	Querschnitt in qcm	Widerstand der Primärwicklung in Ω	Windungszahl	Widerstand der Sekundärwicklung in Ω	Windungszahl
Ring Fe_1 aus geglühtem Fe Draht	—	—	—	0,10	4,72	393	23,67	322
Ring Fe_2 aus geglühtem Holzkohleneisen	1,95	2,50	0,90	0,25	5,36	349	25,80	267
Ring Ni_1 aus weichem Rein-Nickel	2,21	2,60	1,99	0,39	15,3	535	48,0	270
Ring Ni_2 aus hartem Rein-Nickel-Draht	—	—	—	0,29	10,6	418	32,0	320
Ring aus Nickelstahl 42 % Ni	2,20	2,60	2,11	0,42	16,0	563	53,0	286
Ring aus Nickelstahl 36 % Ni	2,20	2,60	2,11	0,42	16,0	563	52,0	273
Ring aus Nickelstahl 30,20 % Ni	2,20	2,63	2,13	0,46	15,6	541	45,0	225
Ring aus Nickelstahl 26,84 % Ni	2,21	2,66	2,14	0,48	16,1	546	48,5	254

Wie ersichtlich, haben sämtliche Ringe rechteckigen Querschnitt und zwar ist ihre Dicke klein im Vergleich zum Radius. Es ist diese Form notwendig, um bei kleinem Ringdurchmesser doch keine grosse Verschiedenheit der magnetisierenden Kraft für verschiedene Punkte des Querschnittes zu erhalten, entsprechend der naturgemäss ungleich dichten Verteilung der Magnetisierungswindungen an der Innen- und Aussenseite. Zugleich bleibt durch die Höhe der Ringe eine gewisse Grösse des Querschnittes gewahrt.

Nachdem die Dimensionen der Toroïde mit Mikrometerschraube und Fühlhebel genau gemessen und notiert waren, wurde zur Bewicklung geschritten. Zunächst wurde ein dünnes, etwa 6 mm breites weisses Seidenband gleichmässig in einer Lage herumgewickelt, um eine sichere Isolation der Drahtwindungen von dem Metallkörper zu haben. Darüber kam zuerst die Sekundärwicklung, bei allen Ringen aus Kupferdraht von blank 0,07 mm Durchmesser, doppelt mit weisser Seide umsponnen, bestehend. Sie wurde unterhalb der Primärwindungen angebracht, um erstens einen gewissen Schutz der feinen Drähte gegen mechanische Verletzungen beim Einbau der Ringe in den Druckzylinder zu haben und zweitens, um die „Luftkorrektion", d. h. den schädlichen Raum zwischen Sekundärwicklung und Metallkörper tunlichst zu verkleinern.[1]) Die erforderliche Drahtlänge wurde auf ein Holzschiffchen aufgespult und damit der Ring gleichmässig in einer Lage bewickelt. Die feinen Drahtenden wurden auf etwa 1 cm Länge miteinander verdreht. Ueber die sekundäre Wicklung kam abermals weisses Seidenband und darauf wurden die primären Windungen möglichst gleichmässig mit mässiger Spannung in zwei bis drei Lagen gewickelt. Zwischen den einzelnen Lagen wurde ebenfalls zwecks besserer Isolation und gleichmässigerer Wicklungsmöglichkeit weisses Seidenband angebracht.

Der Primärdraht, doppelt mit weisser Seide umsponnen, war bei allen Ringen 0,2 mm dick (blank). Die Drahtenden wurden auf ein kurzes Stück miteinander verdrillt.

[1]) Vergl. darüber I. A. Ewing, Magnetische Induktion in Eisen und verwandten Metallen, § 56.

War ein Ring fertig gewickelt, so wurde er nach Bestimmung des Widerstandes der primären und sekundären Wicklung in den Druckzylinder eingebaut.

Um eine rasche Expansion ausüben zu können, war es vorteilhaft, Wasser wegen seiner geringen Kompressibilität und Viskosität als Druckflüssigkeit zu verwenden. Der Ring dagegen musste in einem Oelbade sich befinden. Dies wurde durch folgende Anordnung ermöglicht. Fig. 1. Der Druckzylinder, ein Stahlrohr von der Société Genevoise pour la Construction d'Instruments de Physique in Genf, besass 40 mm inneren, 90 mm äusseren Durchmesser und etwa 80 cm Höhe und war oben durch die starke durchbohrte Schraube *S*, die den Messingkonus *K* auf die Lederdichtung *d,d* presste, abzuschliessen. Der hohle Fortsatz des Konusses ragte oben über die Schraube *S* etwas heraus. Unten erweiterte sich die Bohrung zu einem grossen konischen Loche, in welches der Hartgummikonus *H* genau hineinpasste. Dieser wiederum hatte 4 Bohrungen, die sich ebenfalls an der unteren Seite konisch erweiterten und zur Aufnahme von 4 kleinen, an den Zuführungsdrähten angelöteten Messingkonussen *k,k* dienten;[1]) nur so war ein druckdichter Abschluss zu erreichen. Die 4 seidenumsponnenen Drähte waren durch das Hartgummirohr *r*, das in den Konus *H* hineingeschraubt war, aufwärtsgeführt; das Rohr *r* war um ein beträchtliches höher als der Ansatz des Messingstückes *K*, um bei Undichtwerden des Hartgummikonusses das Durchsickern von Wasser zu den Drähten zu verhüten. Zwecks genügender gegenseitiger Isolation war über die beiden primären Drähte noch je ein dünnes Glasrohr geschoben.

An den Hartgummikonus *H* war als Oelbehälter ein zylindrisches Messingrohr von 32 mm lichter Weite und 50 mm Höhe zu schrauben, das unten einen 40 cm langen Ansatz aus einem etwa 1 cm weiten Messingrohre trug. Der Ansatz wurde deshalb so lang gewählt, um bei auftretenden Undichtheiten der Drahtkonusse *kk* ein Eindringen von Wasser zum Ringe *R* tunlichst lange hintanzuhalten.

[1]) Der Deutlichkeit halber in der Figur nur 2 gezeichnet.

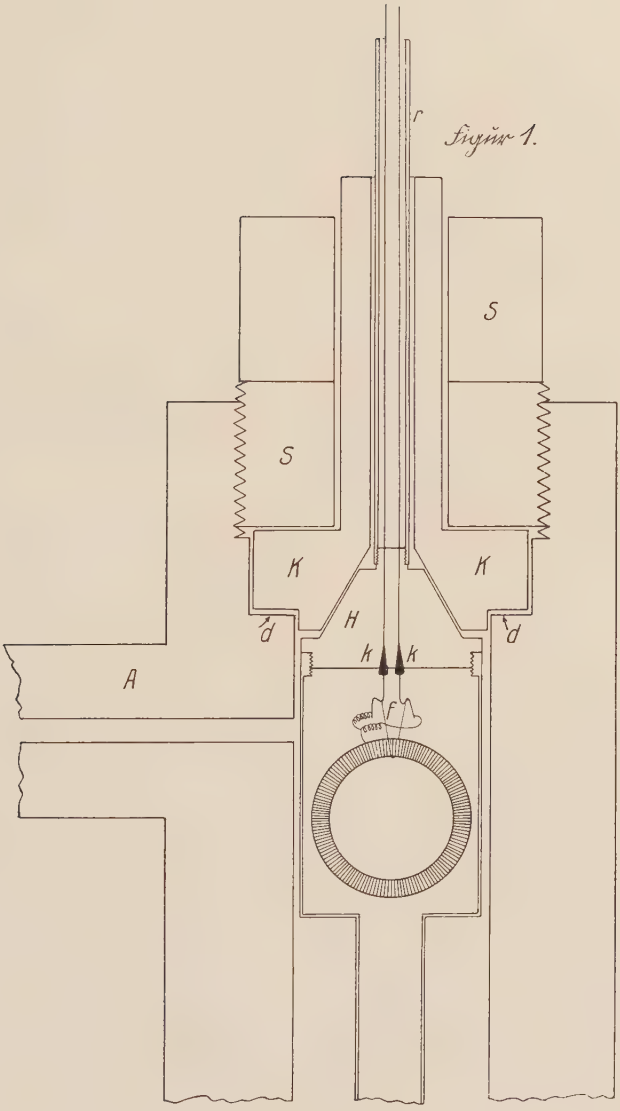


figure 1.

Die Zusammensetzung geschah in folgender Weise: Der fertig gewickelte Ring wurde in Paraffinöl gelegt und so unter den Rezipienten einer Kolbenluftpumpe gebracht. Bei vorsichtigem Evakuieren entwich allmählig die zwischen den Windungen noch vorhandene Luft und das Oel füllte nach Zulassen der Luft alle Zwischenräume aus.

Unterdessen wurde der Hartgummikonus *H* mit Marineleim bestrichen, in das erwärmte Messingverschlusstück *K* eingepresst und unter mässigem Drucke erkalten gelassen. Die 4 Drahtkonusse wurden schon vorher eingekittet. Frisches Einkitten war natürlich nicht bei jedem Ringe nötig, sondern nur, wenn durch das wiederholte Anlöten der Wicklungsenden an die Zuführungsdrähte entweder die Konusse *k*, oder durch Abschrauben des Oelbehälters der grosse Hartgummikonus *H* undicht geworden war.

Nun wurde der Ring aus dem Oelbade genommen, an einem starken Faden *f*, der an Ausbiegungen der beiden primären Zuführungsdrähte befestigt war, aufgehängt, und die 4 Drahtenden mit den Zuleitungsdrähten verlötet. Infolge der Zähflüssigkeit des Oeles blieb der grösste Teil desselben in der kurzen Zeit, die das Einhängen erforderte, zwischen den Windungen sitzen.

Erwähnt mag hier werden, dass einige Ringe, um überhaupt Platz in dem Oelbehälter zu finden, koaxial mit diesem, also nicht wie in der Zeichnung, eingehängt werden mussten.

Nun wurde der Oelbehälter, dessen Ansatzrohr unten mittels eines Fingers verschlossen gehalten wurde, mit dem luftfreien Paraffinöl gestrichen voll gefüllt, mit der anderen Hand sodann der Messingkonus *K* angefasst, der daran befindliche Ring langsam in das Oelbad eingetaucht und endlich durch Drehen der Oelbehälter an den Hartgummikonus angeschraubt. Zwecks öldichter Abschliessung war hier ein Dichtungsring aus dünnem glatten Karton eingelegt. Nun wurde das ganze System über den mit Wasser gefüllten Druckzylinder gehoben, das Ende des Oelbehälters unter die Wasseroberfläche gebracht, der Finger weggezogen, die Röhre in den Druckzylinder langsam eingesenkt und derselbe durch Zudrehen der Schraube *S* abgeschlossen.

Der Druckzylinder war mit einem kurzen, seitlich bei *A* anschraubbaren Kupferrohre von etwa 3 mm lichter Weite mit der Cailletet'schen Pumpe, ebenfalls von der Société Genevoise, verbunden. Das Manometer, ein Instrument von Schäffer und Budenberg, bis zu 500 Atmosphären[1]) zeigend, von 5 zu 5 Atmosphären geteilt, war mittels eines Ducretet'schen Hahnes zum Abschalten eingerichtet worden, um bei den raschen Expansionen nicht Schaden zu leiden. Um jedoch ein fortwährendes Auf- und Zuschrauben des Hahnes zu vermeiden, wurde dieser ein- für allemal so gestellt, dass sich die Druckänderungen nur langsam zum Manometer fortpflanzen konnten.

Das ganze Drucksystem entsprach der oben genannten Bedingung einer genügend raschen Expansion in ausreichendem Masse. In der Tat war die zu einer Expansion erforderliche Zeit sicher kleiner als $^1/_{30}$ sec., wie aus einer einfachen Rechnung hervorging, eine Zeit, die in Hinblick auf die Schwingungsdauer des Galvanometers (6 sec. zwischen zwei Umkehrpunkten) als für ballistische Zwecke hinreichend klein erachtet werden konnte. Expandiert wurde durch eine ruckweise Drehung an der Ventilschraube der Pumpe.

B) Schaltung.

Eine gewisse Schwierigkeit bot die Herstellung der nötigen Feldstärken zum Magnetisieren der Ringe. Da die Ringwicklung den Druckänderungen ausgesetzt ist, wird der Widerstand, und damit die Stromstärke in der primären Leitung geändert. Um diese Aenderung auf ein nicht mehr störendes Mass herunterzudrücken, müssen Vorschaltwiderstände, gross gegen die Ringwiderstände in Reihe dazu geschaltet werden. Diese bedingen aber höhere Spannung der Stromquelle.

Beispielsweise soll ein Strom von 0,5 Ampère, entsprechend der höchsten gewünschten Feldstärke, die Magnetisierungswindungen durchfliessen. Der Ringwiderstand plus äusserem Widerstand belaufe sich dabei auf 140 Ohm. Die elektromotorische Kraft muss dann 70 Volt betragen. Soll nun der Magnetisierungsstrom auf 0,02 Ampère (kleinste Feldstärke)

[1]) Unter „Atmosphäre" sei in folgendem immer der Druck in $\frac{kg}{qcm}$ verstanden. Vergl. übrigens Seite 40, Fussnote.

verringert werden, so müssten noch 3500 Ohm zugeschaltet werden. Man müsste also eine Reihe von Vorschaltwiderständen zwischen 3500 und 140 Ohm zur Verfügung haben, die gestatten, den Strom zwischen 0,02 und 0,5 Ampère in mindestens 10 Abstufungen regulieren zu können, ohne sich dabei wesentlich zu erwärmen, eine Anordnung, die zum mindesten recht unbequem wäre.

Ein anderes Mittel wäre die Variierung der Spannung bei constantem Widerstande. Um dann die zu vermeidenden Stromschwankungen genügend klein zu machen, müssten, wie wir später sehen werden, bei kleinen Feldstärken etwa 300 Ohm vorgeschaltet werden. Für 0,5 Ampère wäre dann eine Spannung von 150 Volt erforderlich, die mir nicht zur Verfügung stand.

Mit folgender Anordnung wurde schliesslich durch Combination beider Methoden ein Ausweg gefunden.

Die im Zimmer vorhandene 60 Volt-Leitung (von einer Akkumulatorenbatterie im Keller gespeist) wurde durch einen 70 m langen, blanken, 0,7 mm starken Konstantandraht geschlossen, der horizontal und bifilar zwischen kleinen Porzellanisolatoren auf einer Wandmarmorplatte gespannt war. Der Widerstand betrug etwa 100 Ohm, der Strom im Drahte also nur 0,6 Ampère, sodass eine auf die Constanz der Spannung schädlich wirkende Erwärmung ausgeschlossen war.

Durch Abzweigen von verschiedenen Punkten dieses Widerstandes konnte ich jede beliebige Spannungsdifferenz bis nahezu 60 Volt herstellen. Mit Rücksicht auf den verschiedenen Verlauf der Permeabilitätskurven der zu untersuchenden Metalle wurde eine grössere Anzahl von Abzweigungen, im ganzen 14, angelegt, um jedes Material bei den geeignetsten Feldstärken untersuchen zu können. Die einzelnen Drähte führten zu einer Art Doppelzellenschalter, dessen Doppelfeder mit dem einen Ende auf den 14 Kontaktknöpfen, mit dem anderen auf drei Segmenten schleifen konnte. Stand die Feder auf dem ersten Segment, so waren 300 Ohm vor den Ring geschaltet, während bei dem zweiten nur mehr 200, bei dem letzten nur mehr 100 Ohm vorgeschaltet blieben. (Vergl. Figur 2). Diese stufenweise Abnahme des Widerstandes war

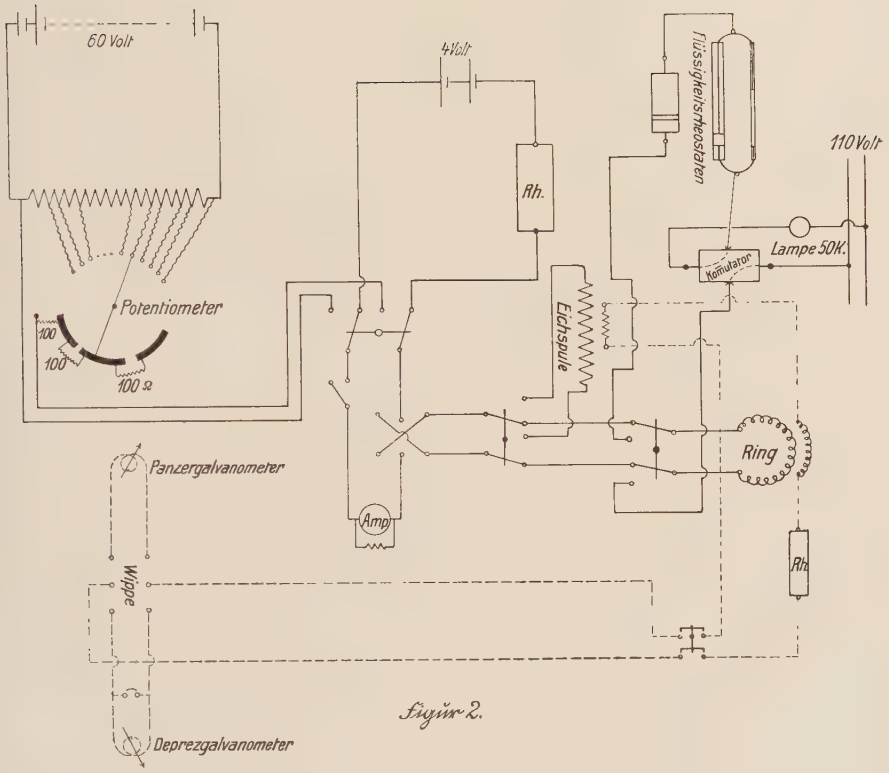
notwendig, da ich sonst bei der gegebenen Spannung (60 Volt) und konstanten 300 Ohm keinen Magnetisierungsstrom von 0,5 Ampère hätte bekommen können. Andererseits erwiesen sich die 300 Ohm nur für kleine Feldstärken nötig, während für grössere Feldstärken auch 200 und schliesslich 100 Ohm genügten, um die schädlichen Stromschwankungen genügend zu reduzieren.

Diese 3 Vorschaltwiderstände von je etwa 100 Ohm (genauer: 125, 117, 113 Ohm) bestanden aus Manganindrähten, doppelt mit weisser Seide umsponnen, die bifilar auf Holzspulen aufgewickelt waren. Entsprechend den verschiedenen Strombelastungen wurde 0,6, 0,4 und 0,3 mm starker Draht genommen. Die Verwendung von Manganin schien wegen des kleinen Temperaturkoëffizienten dieses Metalles geboten.

Die Schaltung wurde nun folgendermassen getroffen (Figur 2):

In Reihe zu dem ebenbeschriebenen „Potentiometer" befand sich die Magnetisierungswicklung der Toroïde sowie als Strommesser ein Universalgalvanometer von Siemens und Halske, das Ströme bis zu 150 Milliampère, mit Nebenschluss von $^1/_9$ Ohm bis zu 1,5 Ampère abzulesen erlaubte. Jeder Teilstrich entsprach dabei 1 bezw. 10 Milliampère, so dass Bruchteile hievon noch sicher zu schätzen waren. Eine starke Quecksilberwippe gestattete ferner eine plötzliche Umkehr der Stromrichtung im Ringe derart, dass das Ampèremeter davon unbeeinflusst blieb. Mittels eines Hauptumschalters konnte das ganze System stromlos gemacht werden. Ein Doppelumschalter schaltete als Stromquelle statt des Potentiometers für gewisse Versuche 2 Akkumulatoren und einen Rheostaten ein. Durch einen zweiten Doppelumschalter konnte statt der Ringwindungen ein Solenoïd eingeschaltet werden, das zur Eichung des Galvanometers in Anwendung kam.

Da die Komponenten des magnetischen Erdfeldes in Laboratorien bekanntlich fortwährenden Veränderungen unterworfen sind, wurde als Ersatz für den Erdinduktor diese, soweit bekannt von W. Thomson vorgeschlagene Art der Eichung gewählt. Die „Eichspule" war folgendermassen konstruiert:


60 Volt
4 Volt
Rh.
Flüssigkeitsrheostaten
110 Volt
Lampe 50K.
Kommutator
Potentiometer
100
100
100 Ω
Eichspule
Ring
Amp
Panzergalvanometer
Wippe
Rh
Deprezgalvanometer

Figur 2.

Auf ein zirka 80 cm langes, möglichst zylindrisches Glasrohr von 3.38 cm Durchmesser wurden 800 Windungen 0,7 mm starken (blank), doppelt mit weisser Seide umsponnenen Kupferdrahtes sorgfältig gleichmässig auf der Drehbank aufgespult. Auf das cm Länge trafen 10,4 Windungen. In der Mitte wurde ein 20 cm breites Papierband über die primären Windungen gelegt und darauf die Sekundärwicklung angebracht, bestehend aus 584 Windungen von blank 0,2 mm starken doppelt mit weisser Seide umsponnenem Kupferdrahte. Ihre Enden waren zu zwei auf Hartgummisäulen angeschraubten Messingklemmen geführt.

Das Prinzip dieser Eichspule ist folgendes:

Die Galvanometerausschläge sind proportional der ganzen Elektrizitätsmenge, die das Galvanometer während der Dauer des Stromstosses durchfliesst und diese ist wiederum proportional der Aenderung der Kraftlinienzahl innerhalb der Sekundärwicklung. Nun ist es ein Leichtes, aus den Dimensionen der Eichspule die durch einen bekannten Strom hervorgerufene Anzahl von Kraftlinien zu berechnen. Es ist bekanntlich die magnetische Kraft in einem Solenoïd:

$$H = 4\,\pi\,n\,i,$$

wobei n die Anzahl der Magnetisierungswindungen pro cm Länge und i den Strom in *C. G. S.* Einheiten gemessen bedeutet. Die Gesamtzahl der innerhalb der Sekundärspule verlaufenden Kraftlinien erhält man folglich durch Multiplikation dieses Ausdruckes mit dem Querschnitte f der primären Spule und die gesamte dabei auftretende Elektrizitätsmenge des Stromstosses ist gegeben durch den Ausdruck:

$$\frac{4\,\pi\,i\,n\,f\,N_s}{R_s},$$

wenn unter N_s die Sekundärwindungszahl auf der Eichspule, und unter R_s der Widerstand des Schliessungskreises verstanden wird.

Analog entspricht jeder Aenderung der Gesamtinduktion B im Ringe ein gewisser Galvanometerausschlag, und man erhält zur Berechnung derselben folgende Proportion:

$$\frac{\Delta\,M\,N_r}{R_r} : \alpha_r = \frac{4\,\pi\,i\,n\,f\,N_s}{R_s} : \alpha_s,$$

wenn ΔM die zu bestimmende Gesamtinduktion, N_r die Windungszahl auf der Sekundärspule des Ringes, R_r den Widerstand dieser Wicklung und α_r α_s die beobachteten Galvanometerausschläge bedeutet. Ist $R_s = R_r$, was durch Hintereinanderschalten der beiden Sekundärspulen erreicht wird, so fallen diese Faktoren heraus.*)

Bequem ist es für die Berechnung der Gesamtinduktionsänderung, die Induktionsänderung pro Skalenteil des Galvanometerausschlages und pro qcm des Ringquerschnittes zu bestimmen, welche, wie ersichtlich, gegeben ist durch den Ausdruck:

$$\beta = \frac{\Delta M}{\alpha_r} = \frac{4 \pi i n f N_s}{N_r \cdot \alpha_s \cdot q}$$

wenn q den Ringquerschnitt bedeutet. Man hat dann nur nötig, die jeweiligen Galvanometerausschläge mit β zu multiplizieren, um die im Ringe vorhandene Gesamtinduktion B zu erhalten.

Wesentlich ist, bei der Verwendung einer Eichspule auf Homogenität des erzeugten magnetischen Feldes zu sehen, was nur zu erreichen ist, wenn der Durchmesser des Solenoïdes klein ist gegen seine Länge $\left(\frac{l}{2r} \text{ mindestens } = 20\right)$ und wenn sehr gleichmässig gewickelt wird.

Die von den Primärwindungen eingeschlossene Fläche betrug 9,43 qcm. Bei der Aufstellung dieses Solenoïdes wurde darauf Rücksicht genommen, dass dasselbe keine direkte magnetische Einwirkung auf das Galvanometer ausüben konnte.

Bei der Eichspule war es manchmal angenehm, höhere Stromstärken, als sie dem Potentiometer entnommen werden konnten, verwenden zu können, um trotz verschiedener Ballastwiderstände im Sekundärkreise immer angemessene Galvanometerausschläge zu erzielen; daher war die zweite, oben erwähnte Stromquelle vorgesehen.

Es erübrigt nun noch, die Entmagnetisierungsvorrichtung zu beschreiben.

Um den ferromagnetischen Körper nach beliebigen Versuchen wieder in den ursprünglichen „jungfräulichen“ Zustand

*) Vergl. Ewing, l. c. § 53.

zu versetzen, ist es bekanntlich notwendig, in den Magnetisierungswindungen einen Wechselstrom kreisen zu lassen, dessen Anfangsstromstärke mindestens dem zur Verwendung gelangten höchsten Magnetisierungsstrome gleichkommt, und der allmählich schwächer und schwächer werdend, bis auf Null abnimmt.

Dazu wurde nach mehreren Versuchen folgende Anordnung getroffen: Ein 1 m langes, 1,5 cm weites Glasrohr, mit Zinksulfatlösung gefüllt, war unten mit einem durchbohrten, eingekitteten Korke verschlossen. Durch die Bohrung führte ein dicker Kupferdraht, der in der Röhre in eine amalgamierte Zinkscheibe endigte. Eine zweite Zinkscheibe war an einem 120 cm langen Kupferstängchen angenietet und konnte in dem Glasrohre beliebig verschoben werden. Zum Schutze des Kupferstängchens gegen die Flüssigkeit war über dasselbe ein dünnes Glasrohr geschoben und mit Wachskitt abgedichtet.

Parallel zu diesem Flüssigkeitsrheostaten war ein zweiter, 150 cm langer, in gleicher Weise konstruierter, nur mit viel engerer Röhre geschaltet, bei dem nicht Zinkscheiben, sondern Zinkdrähte zur Verwendung gelangten.

Endlich war noch in Reihe mit diesen beiden Rheostaten ein kurzes, weites Glasrohr mit Zinkscheiben und $Zn\,SO_4$ Lösung verbunden, um die Anfangsstromstärke des Wechselstromes bequem regulieren zu können.

Als Stromquelle diente beim Entmagnetisieren die städtische Gleichstromleitung von 110 Volt Spannung unter Vorschaltung einer 50kerzigen Lampe, als Umformer ein Walzenkommutator, der durch einen kleinen Elektromotor angetrieben wurde und 8 bis 10 Stromwechsel in der Sekunde erzeugte. (Vergl. Fig. 2).

War eine Entmagnetisierung nötig, so wurden zuerst die Zinkscheiben in dem 1 m langen Widerstande zur Berührung gebracht, der zweite 1,50 m lange bis zu einer gewissen markierten Tiefe eingetaucht, der Elektromotor eingeschaltet und durch einen weiteren Doppelumschalter die Enden der Primärwicklung des Ringes von dem Magnetisierungssystem ab- und in den Wechselstromkreis eingeschaltet. Die ge-

wünschte Anfangsstromstärke desselben war durch die Stellung des kurzen Flüssigkeitsrheostaten gegeben.

Der im System kurz vor dem Austreten der Zinkscheibe fliessende Strom wäre immer noch gross genug gewesen, um merkbaren remanenten Magnetismus zu hinterlassen. Diesem Uebelstande half der zweite, parallel geschaltete, enge Flüssigkeitsrheostat ab, da sein Anfangswiderstand dem des ersten gleich war, wenn dessen bewegliche Scheibe gerade noch in die Lösung eintauchte. Zwar änderte sich beim Abschalten des ersten die Stromstärke noch sprungweise, doch wurde dieser kleine Sprung durch die nachfolgenden Stromwechsel bei gleichzeitiger Vergrösserung des zweiten Widerstandes unschädlich gemacht.

Die Vorrichtung mag vielleicht etwas kompliziert erscheinen, erwies sich aber als unbedingt nötig, um eine wirklich vollständige Entmagnetisierung erreichen zu können, die für gewisse, später zu besprechende Kontrollversuche erforderlich war.

Bei den ersten Versuchen über allseitigen Druckeinfluss wurde als ballistisches Galvanometer ein Drehspulen-Instrument von Edelmann verwendet. Sein innerer Widerstand betrug bei Hintereinanderschalten der beiden gleichen Spulenhälften 500 Ohm. Die Empfindlichkeit war

$$1 \times 10^{-8} \frac{\text{Ampère}}{\text{Skalenteil}}$$

für Dauerstrom. Leider erwies sich dieses Instrument als zu unempfindlich; es wurde daher ein Panzergalvanometer nach du Bois und Rubens[1]) aufgestellt. Um die Erschütterungen der Wand zu umgehen, wurde das Galvanometer in eine Julius'sche Aufhängung[2]) eingebaut. Dicht unter dem schwebenden Gestelle war ein Wandbrett angebracht, das eine sicher wirkende Arretiervorrichtung und die Paraffinöldämpfung trug. Das gewählte Magnetgehänge bestand aus 7 Stahlfedern von je etwa 5 mm Länge; der Spiegel hatte 8 mm Durchmesser.

---

[1]) H. du Bois u. H. Rubens. Ann. d. Phys. 2. p. 84. 1900.
[2]) W. H. Julius, Wied. Ann. 56. p. 150. 1895.

Nachdem der Quarzfaden auf Torsionslosigkeit geprüft war, wurde das Galvanometer astasiert. Die Schwingungsdauer wurde auf 6 Sekunden einfache Schwingungsdauer gebracht. Eine weitere Steigerung derselben erwies sich mit Rücksicht auf die Konstanz des Nullpunktes als ungünstig.

Zur Verwendung kamen zwei Galvanometerspulen von 98,3 und 94,2 Ohm, die parallel geschaltet wurden. Dadurch war der günstigen Bedingung, Gleichheit des inneren und äusseren Widerstandes, bei allen Ringen annähernd genügt. Das Instrument zeigte dann eine Empfindlichkeit von etwa

$$1{,}5 \times 10^{-9} \frac{\text{Ampère}}{\text{Skalenteil}}$$

für Dauerstrom. Der Abstand Skala—Spiegel betrug 2 m. Für die ballistischen Messungen wurden die Dämpferscheibchen soweit wie möglich von dem am Gehänge befindlichen Dämpferflügel entfernt.

Ursprünglich sollte das Panzergalvanometer nicht nur zur Messung der Druckeinwirkungen, sondern auch mit entsprechendem Ballastwiderstand zur Aufstellung der Permeabilitätskurven der verschiedenen zu untersuchenden Metalle verwendet werden. Doch zeigte es sich für diese Messungen direkt unbrauchbar. In der Tat genügten verhältnismässig kleine ballistische Ausschläge, um den Nullpunkt jedesmal beträchtlich dauernd zu verschieben. Dagegen verursachten die durch Entspannen des Druckes erzeugten Ausschläge nicht die geringste Nullpunktsverschiebung. Der Grund liegt in der bei starken Induktionsströmen leicht eintretenden Aenderung der Magnetisierung der Magnetchen des Gehänges. Für die Permeabilitätsmessungen gelangte daher das oben beschriebene Galvanometer nach Deprez-d'Arsonval zur Verwendung, das ebenfalls in einer einfachen Julius'schen Aufhängung dicht neben dem Panzergalvanometer stand.

Die beiden Galvanometerzuleitungen liefen in einem Bergmannrohre in die Nähe des Beobachtungsplatzes, von dem aus durch eine Paraffinwippe das eine oder andere Galvanometer eingeschaltet werden konnte. In das Sekundärsystem waren ferner noch eingeschaltet die Sekundärwicklung am

Ringe und an der Eichspule, als Ballastwiderstand ein Stöpselrheostat[1]) und endlich ein Paraffinausschalter. Für das Drehspulengalvanometer war noch ein auf Paraffin montierter Kurzschliesser zwecks rascher Dämpfung vorhanden. (Vergl. Fig. 2).

Die beiden Beobachtungsfernrohre waren dicht neben einander aufgestellt; eine Glühlampenreihe von fünf 16kerzigen Lampen beleuchtete beide untereinander befindlichen Skalen.

II. Prüfung der Apparate und Gang eines Versuches.

Vor jeder Versuchsreihe wurde die ganze Anordnung auf ihr richtiges und einwandfreies Funktionieren geprüft.

Erstens wurde das Panzergalvanometer auf Proportionalität der Ausschläge und Gleichheit derselben nach beiden Seiten mittels der Eichspule untersucht. Deren primäre Stromstärke dürfte jedoch nicht über ein gewisses Mass gesteigert werden, da sonst das gefürchtete Ummagnetisieren des Gehänges begann. Immerhin waren die Ausschläge schon vor dieser „kritischen" Stromstärke weit grösser, als bei den Messungen der Druckeinwirkung, sodass für diese Proportionalität mit dem Strome garantiert war.

In ähnlicher Weise wurde auch das Drehspulengalvanometer untersucht.

Ferner erwies es sich als notwendig, den Beobachtungsraum auf konstanter Temperatur zu halten, da nach Temperaturschwankungen im Zimmer oft stundenlang gewartet werden musste, bis sich die Nullpunktswanderungen im Galvanometer gelegt hatten. Es wurde daher, da ohnehin alle Beobachtungen im Winter gemacht wurden, der im Raume befindliche Gasofen Tag und Nacht auf halbe Stärke gestellt, brennen gelassen, sodass eine nahezu konstante Temperatur von 20° C erzielt werden konnte.

[1]) Erwähnt mag hier werden, dass das Panzergalvanometer bei allen Beobachtungen ohne Ballastwiderstand benutzt wurde.

Grosse Sorgfalt wurde bei der Prüfung der Apparate darauf gelegt, ob nicht etwa bei plötzlicher Expansion, ohne dass der Ring einer magnetisierenden Kraft unterworfen war, ein Ausschlag auftrat. In der Tat war anfänglich ein solcher vorhanden, und es waren zahlreiche Versuche nötig, denselben auf ein nicht mehr störendes Mass herunterzudrücken. Aus denselben ging hervor, dass es sich dabei um eine Superposition von zweierlei Einflüssen handelte, einmal Thermoströme, deren Entstehung auf eine Abkühlung der Lötstellen, zwischen Sekundärwicklung und Zuleitungsdrähten zurückzuführen war, ferner Restbestände von remanentem Magnetismus, die sich bei Druckänderung durch einen Induktionsstoss äusserten. Bekanntlich ist ja der Einfluss von Druck u. s. w. auf induzierten und remanenten Magnetismus ganz ähnlich[1]). Erst durch die oben beschriebene Entmagnetisierungsvorrichtung gelang es, jede Spur von remanentem Magnetismus zu vernichten.

Grössere Schwierigkeiten bot die Wegschaffung der bei der Druckentspannung entstehenden Thermoströme. Ausgegangen wurde dabei von folgender Ueberlegung: Wenn es gelingt, eine Anordnung zu treffen, bei welcher beide Lötstellen zwischen Zuleitungsdrähten und Sekundärdrahtenden gleich viel und gleichzeitig durch die Expansion abgekühlt werden, so fallen die Thermoströme weg. Diese Bedingung wurde in nachstehender Weise soweit wie möglich erfüllt. Zum Löten wurde nur so viel Lot genommen, dass es eben eine sichere Verbindung der beiden Drähte herstellte. Die beiden in den Oelbehälter hineinragenden Zuleitungsenden wurden sorgfältig gleich lang gemacht, sehr nahe nebeneinander parallel geführt und auch die Enden der Ringwicklung bis dicht zu den Lötstellen miteinander verdrillt. So war es tatsächlich möglich, diese Fehlerquelle fast gänzlich zu beseitigen. Bei einigen Ringen gelang es, den Ausschlag überhaupt völlig zu unterdrücken.

Es ist nun wohl angezeigt, an Hand eines Beispieles den bei den Versuchen eingeschlagenen Weg anzugeben.

---

[1]) Vergl. Ewing. l. c. § 125—127.

Nehmen wir dafür den Eisenring Fe_2 (vergl. obige Tabelle).

Es war wünschenswert, vor den eigentlichen Druckversuchen die Permeabilität der Toroïde kennen zu lernen. Dazu wurde die Kommutationsmethode gewählt, da es zweifelhaft schien, ob bei der geschilderten Potentiometeranordnung eine rasche und sichere stufenweise Aenderung des Stromes durch drehen der Schleiffeder am Spannungswähler zu erreichen gewesen wäre. Ist aber ein Ausschlag dadurch gefälscht, so ist die ganze weitere Reihe der Beobachtungen, die zu der ersten summiert werden, zu verwerfen. Bei der Kommutationsmethode dagegen wird erst der gewünschte Strom eingeschaltet und dann der beim Kommutieren entstehende Ausschlag abgelesen und halbiert. Wird falsch beobachtet, so ist nur dieser eine Wert unbrauchbar. Zwar sind, um die Galvanometerablenkungen auf ein brauchbares Mass zu reduzieren, bei dieser Anordnung höhere Ballastwiderstände nötig, die wiederum den Nachteil von kleinen Ausschlägen bei Einschaltung der Eichspule mit sich bringen, doch konnte diesem Uebelstande durch stärkere primäre Ströme (als Stromquelle wurden die beiden Akkumulatoren benützt) leicht abgeholfen werden.

Die Feldstärke H wurde berechnet nach der bekannten Formel:

$$H = 4\,\pi\,i\,n$$

oder für Ringe einfacher:

$$H = \frac{2\,i\,N}{r}$$

i Stromstärke im *C. G. S.* System gemessen
N Gesamtzahl der Magnetisierungswindungen
r mittlerer Radius der Ringe.

Die dazugehörige Induktion B ergibt sich, wie schon früher gezeigt, durch Multiplikation der mittels der Eichspule gefundenen Induktion pro Skalenteil und pro qcm mit den beobachteten halben Ausschlägen.

Auf diese Weise untersucht, ergab der Ring die Permeabilitätskurve Figur 6, Kurve Fe_2. Man ersieht, dass man

es in der Tat mit sehr weichem Eisen zu tun hat, was durch das rasche und steile Ansteigen der Induktion B bei noch kleinen Feldstärken H charakterisiert wird.

Zur Bestimmung des allseitigen Druckeinflusses auf die Permeabilität war der Versuchsgang folgender:

Zuerst wurde der Ring sorgfältig entmagnetisiert, hierauf der erforderliche Druck hergestellt, der Spannungswähler auf einen bestimmten Knopf eingestellt und durch Einschalten des Magnetisierungsstromes die gewünschte Feldstärke erzeugt. Nun wurde der Strom einmal kommutiert, um hysteresisähnliche Einflüsse zu vermeiden, hierauf das Galvanometer eingeschaltet und der Druck plötzlich entspannt. Der dabei auftretende Ausschlag ward notiert. Sodann wurde ohne Ausschalten des Magnetisierungsstromes von neuem der Druck erhöht, dann expandiert, der Ausschlag notiert u. s. w., bis die Galvanometerausschläge bei weiteren Expansionen sich gleich blieben. War dieser Zustand erreicht, so wurde das Galvanometer momentan abgeschaltet, wieder komprimiert, der Magnetisierungsstrom abermals einmal kommutiert, das Galvanometer wiederum eingeschaltet und die Versuchsreihe mit umgekehrter Stromrichtung wiederholt. Es war dies eine Vorsicht, die durch das Vorhandensein wie immer gearteter Thermoströme geboten schien. In der Tat unterschieden sich die Ausschläge nach links und rechts gewöhnlich um 1—2 Skalenteile und zwar immer im selben Sinne, eine Differenz, die nur durch das Auftreten von Thermoströmen in Folge der Expansion zu erklären war. Durch Mittelnehmen aus den beiden Beobachtungen kann dieser Fehler eliminiert werden.

War der Ring in dieser Weise bei einer bestimmten Feldstärke untersucht, so wurde er wieder entmagnetisiert und darauf bei einer anderen Feldstärke, aber gleichen Drucke in der beschriebenen Art untersucht. Die Anzahl der beobachteten Punkte, die für die Aufstellung der Druckeinflusskurve nötig waren, richtete sich nach der Form der letzteren.

Folgende Tabelle für 3 Kurvenpunkte des Ringes Fe_2 möge zur Orientierung dienen:

	α_1	α_2	α_3	α_4	α_5	α_6	α_7	
	13,7	6,9	5,2	4,7	4,5	4,4	4,4	rechts
$H = 1{,}5$	15,0	8,1	6,0	5,8	5,7	5,7	5,7	links
	14,3	7,5	5,6	5,3	**5,1**	**5,1**	**5,1**	Mittel
	24,0	9,7	8,8	8,5	8,0	8,0	—	rechts
$H = 7{,}0$	26,0	11,0	9,5	9,7	9,5	9,5	—	links
	25,0	10,3	9,3	9,1	**8,7**	**8,7**	—	Mittel
	7,8	3,9	3,4	3,4	3,4	—	—	rechts
$H = 25{,}0$	9,0	4,8	4,6	4,6	4,6	—	—	links
	8,4	4,3	**4,0**	**4,0**	**4,0**	—	—	Mittel

$p = 300$ Atmosph.

α_1, α_2 . . . bedeuten die Galvanometer-Ausschläge nach rechts und links, in Folge der ersten, zweiten, u. s. w. Expansion erhalten.

Man ersieht, dass die bei denselben Feldstärken für aufeinanderfolgende Expansionen erhaltenen Werte der Ausschläge bei der ersten Expansion bedeutend grösser sind als bei den folgenden, dass sie aber bald einen gleichbleibenden Wert erreichen, und zwar um so eher, je höher die benützte Feldstärke ist. Diese Werte wurden der Berechnung des Druckeinflusses zugrunde gelegt.

Vor Beginn und nach Beendigung einer solchen Versuchsreihe bei einem bestimmten Drucke wurde das Galvanometer jedesmal geeicht, d. h. die Induktion pro Skalenteil aus 2 Eichspulenmessungen mit verschiedenen primären Strömen bestimmt.

Für den Ring Fe_2 ergaben sich z. B. folgende Werte:

$i = 0{,}0173$ Ampère

Galvanometerausschlag { 34,0 vor den Versuchen
34,1 nach den Versuchen

$i = 0{,}0263$ Ampère

Galvanometerausschlag { 51,7 vor den Versuchen
51,6 nach den Versuchen,

Während einer etwa 2 Stunden beanspruchenden Versuchsreihe für einen bestimmten Druck hatte sich, wie ersichtlich, die Galvanometerempfindlichkeit nicht geändert, und trat dieser Fall auch nie ein; nur kleine tägliche Empfindlichkeitsschwankungen waren zu bemerken.

War einmal für einen bestimmten Druck der Einfluss bekannt, so war es erlaubt, für andere Drucke eine entsprechend kleinere Anzahl von Kurvenpunkten zu beobachten. (Vergl. z. B. Fig. 7.)

Interessant ist das erwähnte, bei allen Ringen beobachtete mehr oder weniger rasche Abnehmen des Druckeinflusses mit der Zahl der Expansionen. Es ist dies eine Erscheinung, wie sie ganz analog bei einseitiger Zug- oder Druckwirkung auf bereits magnetisierte Metalle auftritt. Ewing[1]) sagt über diese letztere: „Zunächst sind die anfänglichen Wirkungen, die eine Aenderung der Zugkraft unmittelbar zur Folge haben, meistens sehr beträchtlich und unterscheiden sich von den Erscheinungen, die eintreten, wenn die Belastung schon ein- bis zweimal cyklisch geändert worden ist. Die anfänglichen Wirkungen einer Zugkraft haben viel mit den durch Erschütterung bedingten Veränderungen gemein, selbst wenn wir die Aenderungen der Belastung so vornehmen, dass Erschütterungen nicht eintreten können. . . . Wir müssen mit jedem Gewicht eine mehrmalige Belastung und Entlastung vornehmen, bis die dadurch hervorgerufene Aenderung der Magnetisierung cyklisch wird, d. h. nur unter diesen Umständen ändert sich die Magnetisierung zwischen zwei bestimmten Grenzen, wenn wir den Draht belasten und entlasten."

Auch für das raschere Cyklischwerden der allseitigen Druckeinwirkung bei starken Feldern ist das Analogon bei einseitiger Dilatation vorhanden.

Es erübrigt nun noch, klarzulegen, dass der cyklische, beobachtete Druckeinfluss mit dem statischen, gesuchten Druckeinfluss identisch ist.

---

[1]) Ewing, l. c. § 127, § 187.

Die Ausschläge bei den ersten Expansionen verdanken ihre Entstehung einer Superposition von zweierlei Einflüssen, erstens dem reinen statischen Druckeinfluss, zweitens einer Einwirkung erschütterungsähnlicher Natur, hervorgerufen durch die abwechselnden Dilatationen bei der Druckänderung. Dieser zweite Teil wird aber, wie aus diesbezüglichen Beobachtungen hervorging, rasch kleiner und verschwindet schliesslich. Allerdings steigt die Gesamtinduktion B dadurch um einen geringen Betrag, der jedoch gegen die im Ringe schon vorhandene Kraftlinienzahl zu vernachlässigen ist.

Ist also der „erschütterungsfreie" Zustand erreicht, der durch die Gleichheit der Ausschläge bei jeder Expansion gekennzeichnet ist, so geben diese beobachteten Ausschläge direkt den statischen Druckeinfluss.

Dabei ist allerdings folgende Voraussetzung gemacht: Für die Aenderung der Induktion durch Druck ist es gleichgiltig, ob zuerst komprimiert, dann magnetisiert wird (Methode mit statischem Druck) oder ob die Druckänderungen bei konstantem Magnetisierungsstrom vorgenommen werden (Vorliegende Versuche). Bei einseitigem Druck oder Zug ist diese Forderung im allgemeinen nicht erfüllt.[1]) Die schon in der Einleitung erwähnten Untersuchungen von Honda und Nagaoka erlaubten für allseitigen Druck diese, mit vorliegender Anordnung leider nicht möglichen Kontrollversuche anzustellen und liefern den Beweis für obige Annahme. Vergleicht man dort die Werte der Induktionsänderungen an den Kurven

$$\Delta I = f(\dot{p})_{\ H = \text{const.}}$$
$$\Delta I = \varphi(H)_{\ p = \text{const.}}$$

so ergibt sich, gleiche p und H vorausgesetzt, genau derselbe Druckeinfluss. Ferner ersieht man aus der Kurve $\Delta I = f(\dot{p})_{\ H\ =\ \text{const.}}$, dass derselbe Anfangswert der Induktion nach einem Druckkreisprozesse wieder erreicht wird, dass also bei vorliegenden Versuchen die Induktion bei den auf die jeweiligen Expansionen folgenden Kompressionen, abgesehen von dem anfänglichen geringen Zuwachse durch erschütterungsähnliche Einflüsse, jedesmal auf denselben Wert zurückgeht.

[1]) Vergl. Ewing, l. c. § 124—130.

Ist also der cyklische „erschütterungsfreie“ Zustand erreicht, so schwankt, wie schon erwähnt, die Induktion zwischen zwei bestimmten Grenzen, deren Differenz direkt den statischen Druckeinfluss liefert.

III. Korrektionen und Fehlerquellen.

Es möge gleich an dieser Stelle erwähnt werden, dass die meisten Versuche bei Nacht angestellt werden mussten, da unter Tags störende Einflüsse mannigfachster Art vorhanden waren. Ausser direkten magnetischen Einwirkungen auf das Galvanometer machten sich im Sekundärsystem Induktionsströme, sowie im Primärkreis plötzliches Schwanken der Akkumulatorenspannung — hervorgerufen durch anderweitige Stromentnahme — unangenehm bemerkbar.

Bei der Untersuchung etwaiger Fehlerquellen und anzubringender Korrektionen wurde nach folgendem Gesichtspunkte vorgegangen:

Störende Einflüsse 1. Auf den Ringkörper,
2. Auf die Primärwicklung,
3. Auf die Sekundärwicklung des Ringes.

ad 1.

a) Volumenänderung des Ringkörpers durch Druck.

Diese Korrektion ist leicht berechenbar. Die kubische allseitige Dilatation δ eines Körpers ist gegeben durch den Ausdruck:

$$\delta = \frac{D}{E} 3\,(1-2\,\mu),$$

worin D den Druck in $\frac{\text{kg}}{\text{qmm}}$, E den Elastizitätsmodul, μ den Poisson'schen Koëffizienten $= \frac{\text{Querkontraktion}}{\text{Längsdilatation}}$ des Metalls bedeutet.

Setzt man z. B. für unseren Ring Fe_2 $E = 18000$ und $\mu = 0{,}3$, so ergibt sich als Aenderung der Volumeneinheit bei 300 Atmosphären:

$$\left(\frac{dv}{v}\right) = \frac{3}{18000}\, 3\,(1-0{,}6) = 2 \times 10^{-4};$$

Für die dadurch hervorgerufene Aenderung der Kraftlinienzahl im Ring kommt aber nur die Aenderung der Querschnittseinheit in Betracht. Diese beträgt $^2/_3$ der allseitigen kubischen Dilatation und man erhält also:

$$\left(\frac{dq}{q}\right) = 1{,}3 \times 10^{-4};$$

diese Aenderung der Querschnittseinheit multipliziert mit der jeweils vorhandenen Induktion B gibt die Grösse der Korrektion für die verschiedenen Feldstärken. Je nach dem Sinne des statischen Druckeinflusses muss sie entweder zu den beobachteten Werten addiert oder davon subtrahiert werden.

b) Volumenänderung durch den Magnetisierungsstrom.

Ferromagnetische Körper ändern bekanntlich ihr Volumen bei Magnetisierung; doch ist diese Korrektion bei den hier in Betracht kommenden Feldstärken völlig zu vernachlässigen.[1])

c) Volumenänderung durch Temperatureinflüsse.

Bei der adiabatischen Expansion kühlt sich die Druckflüssigkeit sowie der Ring ab. Es ist z. B. die Abkühlung, die unser Eisenring bei 300 Atmosphären Druckänderung erfährt, gegeben durch den Ausdruck:

$$\delta t = \frac{T \cdot 3\alpha \cdot \delta p}{\varrho \cdot c_p};$$ dabei bedeutet:

$T = 273^0 \times 20^0$, absolute Temperatur des Ringes.
$\alpha = 12 \times 10^{-6}$, linearer Ausdehnungskoëff. von Eisen.
$\delta p = 2{,}94 \times 10^8$, Druckänderung in Dynen pro qcm.
$\varrho = 7{,}8$, Dichte des Ringes.
$c_p = 0{,}11 \times 420 \times 10^5$ spezifische Wärme des Ringes im *C. G. S.* System.

Dann ergibt sich als Temperaturänderung:

$$\delta t = 0{,}08^0;$$

Da das Oel bei dem angenommenen Drucke sich bedeutend stärker abkühlt, etwa um $3{,}4^0$, so gibt der Ring noch Wärme an die ihn umgebenden Oelschichten ab. Wie rasch und wie

[1]) Vergl. K. Honda und H. Nagaoka, Phil. Mag. 4 p. 45 ff. 1902 und Phil. Mag. 49. p. 329—343. 1899.

gross dieser Temperaturausgleich ist, kann nicht berechnet werden, da der Ring durch seine Bewicklung von dem Oele getrennt ist. Doch darf auf Grund von anderen, später folgenden Ueberlegungen eine Abkühlung von $0{,}3^0$ als obere Grenze angenommen werden. Dann beträgt die Aenderung der Querschnittseinheit:

$$\left(\frac{d\,q}{q}\right) = 8 \times 10^{-6},$$

eine Grösse, die ohne weiteres unberücksichtigt bleiben kann.

d) Magnetischer Temperaturkoëffizient.

Der magnetische Temperaturkoëffizient ist bei keinem der untersuchten Metalle*) so bedeutend, dass er bei der angegebenen Temperaturänderung eine merkbare Fehlerquelle bilden könnte, wenn man den Einfluss einer zyklischen Erwärmung und Abkühlung bei konstanter magnetischer Kraft, Bedingungen, welche hier doch vorliegen, in Betracht zieht. Ewing [1]) sagt darüber: „Die erste Wirkung einer Erwärmung gleicht der einer Erschütterung. .... Diese Wirkung ist anderer Natur und oft viel grösser als die umkehrbaren Aenderungen des Magnetismus, die durch abwechselnde Erwärmung und Abkühlung erzeugt werden. Aber wenn eine solche Erwärmung und Abkühlung oft genug wiederholt wird, so wird der Vorgang zuletzt umkehrbar; die Magnetisierung schwankt dann zwischen zwei Werten."

ad 2)

a) Elektrischer Temperaturkoëffizient.

Berechnet man unter Zuhilfenahme der oben gebrauchten Formel die Abkühlung des Kupfers der Ringwicklung bei der adiabatischen Expansion, so findet man bei 300 Atmosphären Druckänderung:

$$\delta\, t = 0{,}12^0.$$

Das Kupfer kann aber auch noch Wärme an die benachbarten Oelschichten abgeben. Da diese Wärmeabgabe nicht zu berechnen ist, ausserdem noch der

b) Druckeinfluss auf die Leitfähigkeit des Kupfers

in Betracht kommt, war es erforderlich, die Widerstands-

*) mit einer einzigen Ausnahme, vergl. die Resultate bei Nickelstahl.

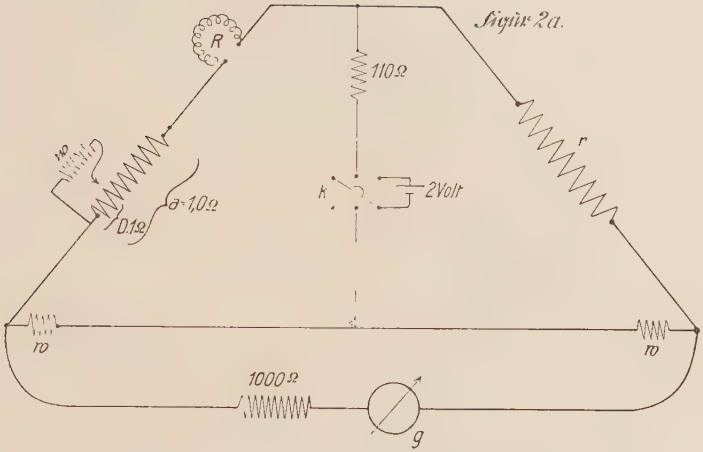
[1]) Ewing. l. c. § 116.

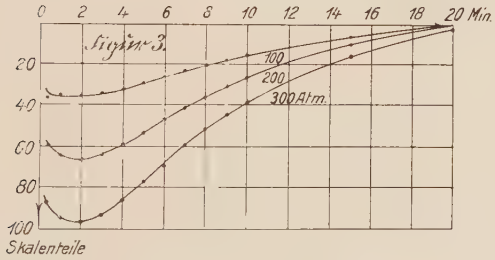
änderung im Primärkreise bei der plötzlichen Druckentspannung experimentell zu bestimmen. Dazu diente folgende Anordnung:

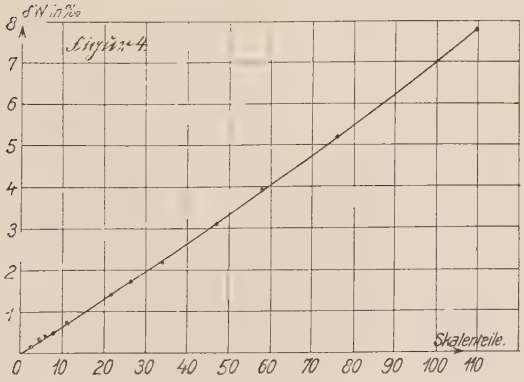
Die Primärwicklung des Ringes R wurde in den linken Zweig einer Wheatstone'schen Brücke eingeschaltet. Fig. 2 a In Reihe dazu lag ein Stöpselrheostat a von 1 Ohm Widerstand. Parallel zu 0,1 Ohm hievon konnten variable Widerstände w zugeschaltet werden. Im anderen Zweige befand sich ebenfalls ein Stöpselrheostat r, dessen Widerstand so abgeglichen war, dass der Schleifkontakt bei Stromlosigkeit der Brücke möglichst in die Mitte des Schleifdrahtes zu stehen kam. Zu dieser waren links und rechts zwei gleiche Widerstände w, w — als gerade Drähte im Boden des Schleifdrahtbrettes gespannt — zugeschaltet, so dass der Gesamtwiderstand 10 Ohm betrug. An die Enden des Messdrahtes waren unter Vorschaltung von 1000 Ohm die Zuleitungen zum Panzergalvanometer G gelegt In den Brückendraht war als Stromquelle ein Akkumulator mit 110 Ohm Vorschaltwiderstand sowie ein Kommutator k eingeschaltet.

Nach Herstellung des gewünschten Druckes wurde längere Zeit (etwa 1 Stunde) gewartet, um Temperaturgleichgewicht im Zylinder zu haben. War dieser Zustand erreicht, so wurde die Brücke ohne Anwendung des Widerstandes w sorgfältig abgeglichen und dann plötzlich expandiert. Der dadurch auftretende Ausschlag des Galvanometers wurde in bestimmten Zeitintervallen abgelesen und notiert. Figur 3.

Um nun diese gefundenen Ablenkungen zur Bestimmung der Aenderung des Widerstandes des Ringbrückenzweiges zu verwerten, war es notwendig, einen weiteren Versuch anzustellen. Dabei wurden die erwähnten Nebenschlusswiderstände w benutzt. Für verschiedene Werte dieser, dem 0,1 Ohm parallel geschalteten Widerstände w wurden die dadurch erzeugten Galvanometerausschläge beobachtet und mit den vorgenommenen Widerstandsänderungen in $^0/_{00}$ in Koordinantenaxen eingetragen. Figur 4. Um Fehler durch Thermoströme zu eliminieren, wurde der Strom kommutiert und das Mittel aus den Ausschlägen genommen.


Figur 2a.
R
110Ω
r
K
2Volt
a-1,0Ω
0,1Ω
10
10
1000Ω
g


Figur 3.
0 2 4 6 8 10 12 14 16 18 20 Min.
20
40
60
80
100
Skalenteile
100
200
300 Atm.


Figur 4.
dV in %
8
7
6
5
4
3
2
1
0 10 20 30 40 50 60 70 80 90 100 110
Skalenteile.

Aus dieser Kurve ergibt sich in Verbindung mit Figur 3 als Aenderung des Widerstandes der Primärwicklung bei 300 Atmosphären Druckänderung nach 20 sec. 6 $^0/_{00}$. Korrespondierende Versuche über die Abkühlung der Sekundärwicklung ergaben eine Widerstandsänderung von etwa 3,5 $^0/_{00}$. Der geringere Betrag ist durch die thermisch geschütztere Anordnung derselben zu erklären.

Diese Werte sind die algebraische Summe von zweierlei Einflüssen: 1) Widerstandsänderung, infolge Temperaturänderung und 2) Widerstandsänderung durch Druckänderung[1]), wobei aber 2) klein gegen 1). Da alle Ringe mit Kupferdraht von derselben Spule gewickelt waren, dürften die erhaltenen Werte für jeden Ring in grosser Annäherung gelten. Sieht man von dem Druckeinflusse auf die Leitfähigkeit des Kupfers ab, so ergibt sich unter Berücksichtigung des elektrischen Temperaturkoëffizienten für Kupfer als Abkühlung der Primärwicklung nach 20 sec. 1,5°, für die Sekundärwicklung etwa 0,9°. Die Abkühlung des Ringkernes durch Temperaturausgleich mit dem Öle wäre dann, weil thermisch geschützter, in derselben Zeit etwa 0,3°, sodass dieser Wert bei der Diskussion der Volumenänderung durch Abkühlung als obere Grenze angesehen werden durfte. Die in Betracht kommende Abkühlung ist sicher noch kleiner, da ja nur der Temperaturausgleich in den ersten 3 sec. (halbe einfache Schwingungsdauer des Galvanometers) eine eventuelle Fehlerquelle bilden könnte.[2])

Vor der Umwertung der eben besprochenen Abkühlung der Magnetisierungswindungen auf die Beeinflussung der Resultate ist es vorteilhaft, noch eine andere Fehlerquelle zu erörtern, nämlich

c) Die Aenderung der Windungszahl pro cm bei Druckänderung.

Bei Kompression oder Expansion kann sich die Gesamtzahl der Magnetisierungswindungen nicht ändern. Dagegen

[1]) Vergl. Lussana, Nuovo Cimento (4) X. p. 73. (3) V. p. 305. 1903. — Lissell, Diss. Upsala 1902. — W. E. Williams, Phil. Mag. 13. May 1907.

[2]) Dazu kommt, dass der Ringkörper mit einer bedeutend kleineren Oberfläche mit dem Oele in Berührung steht, wie die Bewicklung (mit Ausnahme des Ringes Fe_1 und Ni_2), was noch weiter verzögernd auf den Temperaturausgleich wirkt.

erfährt der Ringkörper eine Aenderung seines Volumens, mithin eine Verkürzung oder Verlängerung seines mittleren Radius. Somit ändert sich auch die Windungszahl pro cm und damit die Feldstärke H.

Bezeichnet N die Gesamtzahl der Magnetisierungswindungen,
r_o mittlerer Ringradius ohne Druck,
r_p mittlerer Ringradius unter Druck,

so ist:
$$H_o = \frac{2\,i\,N}{r_o}$$

$$H_p = \frac{2\,i\,N}{r_p}$$

also
$$\delta H = 2\,i\,N\,\frac{(r_p - r_o)}{r_o\,r_p}$$

I. $$\delta H = -H_o\,\frac{\delta r}{r} = \text{Abnahme bei der Expansion.}$$

$\frac{\delta r}{r}$ ist aber gleich $\frac{1}{3}\,\frac{\delta v}{v}$.

Bei der Expansion nimmt die Zahl der Windungen pro cm ab, die Feldstärke sinkt.

Für die Aenderung der Feldstärke bei Expansion durch den elektrischen Temperaturkoëffizienten gilt folgende Ueberlegung:

Es sei: i_o Strom bei Atmosphärendruck im *C. G. S.* System.
i_p Strom bei Druck p im *C. G. S.* System.
w_a äusserer Widerstand des Primärkreises.
w_r Ringwiderstand.

Dann ist:
$$i_o = \frac{e}{w_a + w_r};$$

$$i_p = \frac{e}{w_a + w_r + \delta w}$$

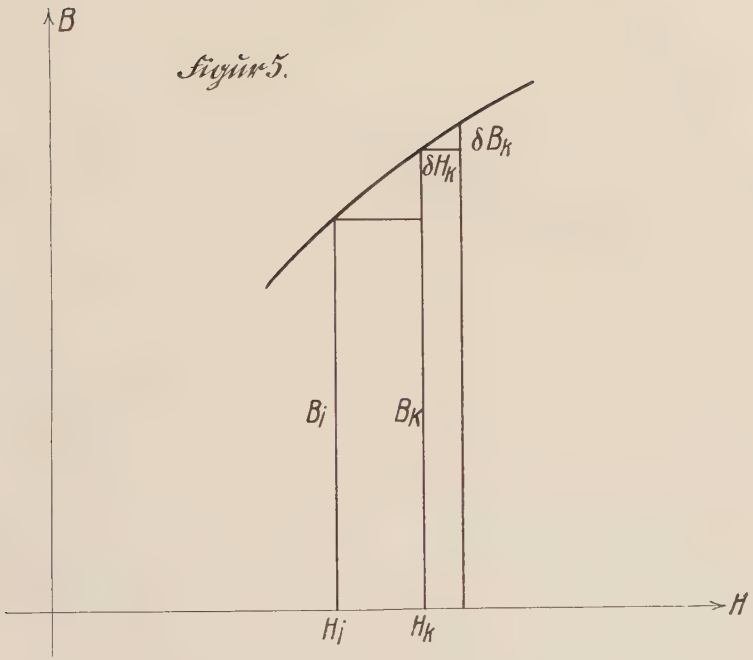
folglich:
$$\delta i = e \cdot \frac{\delta w}{(w_a + w_r)\,(w_a + w_r + \delta w)}.$$

Nun ist:
$$\delta H' = 4\,\pi\,n\,\delta i$$

also
$$= 4\,\pi\,n \cdot e\,\frac{\delta w}{(w_a + w_r)\,(w_a + w_r + \delta w)}$$

$$= 4\,\pi\,n\,i_o \cdot \frac{\delta w}{w_a + w_r} \text{ in grosser Annäherung.}$$

Figuur 5.



Mithin: $$\delta H' = H_0 \cdot \frac{\delta w}{w_a + w_r}.$$

Nun ändert sich aber, wie gezeigt wurde, bei 300 Atmosphären Druckänderung der Ringwiderstand um $6\,^0/_{00}$, mithin ist: $$\delta w = w_r \cdot 0{,}006.$$

Und damit:

II. $$\delta H' = H_0 \cdot \frac{w_r \cdot 0{,}006}{w_a + w_r} = \text{Zunahme bei der Expansion.}$$

Durch die Expansionskälte steigt die Stromstärke und damit die Feldstärke.

Die beiden eben betrachteten Korrektionen haben entgegengesetztes Vorzeichen, es kommt also nur ihre Differenz in Betracht.

Es möge nunmehr ihr Einfluss auf die Aenderung der Induktion, entsprechend dem δH und $\delta \delta H'$ untersucht werden.

Für genügend kleine Intervalle von H ist die Induktionsänderung der Aenderung der Feldstärke proportional. Figur 5.

Dann ist offenbar allgemein:

$$\delta B_k : \delta H_k = (B_k - B_i) : (H_k - H_i).$$

III. $$\delta B_k = \delta H_k \frac{(B_k - B_i)}{H_k - H_i}.$$

Für unseren Eisenring Fe_2 wäre z. B. für $H = 4$ nach Formel II:

$$\delta H'_4 = \frac{4 \cdot 5{,}4 \cdot 0{,}006}{355 + 5} = \text{ca. } 0{,}0004 \text{ C. G. S.}$$

Dann ist analog Formel III:

$\delta B'_4 = 0{,}0004 \cdot 1800 = \text{ca. } 0{,}7$; $H_k - H_i = 1$ gesetzt.

Davon wäre abzuziehen:

$\delta B_4 = \delta H_4 \cdot (B_4 - B_3)$; δH_4 aus Formel I

$= 4 \cdot 0{,}65 \cdot 10^{-4} \cdot 1800$;

$\delta B_4 = \text{ca. } 0{,}5.$

Die anzusetzende Korrektion betrüge somit:

$$\Delta B_4 = \delta B'_4 - \delta B_4 = 0{,}2.$$

Im allgemeinen ist die Korrektion an den steilen Stellen der Permeabilitätskurve am grössten, entsprechend dem grossen Werte von $\frac{d B}{d H}$.

Es liegt nun die Frage nahe, ob wirklich der ganze, auf diese Weise berechnete Fehler hereinspielt, oder ob nur ein kleiner Bruchteil desselben in Betracht kommen könnte. Dafür sprechen zwei Umstände. Erstens ist der Fehler jedenfalls um so kleiner, je kleiner die bei der Expansion erfolgende Abkühlung der Magnetisierungswindungen. Nach 20 *sec.* betrug dieselbe bei 300 Atmosphären Druckänderung $6^0/_{00}$, *id est* 1,5°. Wie gross sie aber nach den ersten 3 *sec.* — halbe einfache Schwingungsdauer des Galvanometers — kann nicht angegeben werden, da nach dieser Zeit das Galvanometer noch nicht in Ruhelage gekommen war, durch Extrapolation aus Figur 3 aber der Wert wegen des örtlichen steilen Verlaufes der Kurve nur ganz ungenau bestimmt werden könnte. Sicher ist die in Betracht kommende Widerstandsänderung kleiner als $6^0/_{00}$.

Zweitens hat Lord Rayleigh[1]) Versuche über den Einfluss von cyklischen Veränderungen einer geringen magnetischen Kraft auf Eisen angestellt und fand, „dass die Permeabilität für jede genügend oft wiederholte, kleine cyklische Aenderung der magnetischen Kraft einen bestimmten Wert hat, einerlei ob das Probestück schon durch die Wirkung anderer Kräfte magnetisiert ist oder nicht. Ihr Wert bleibt merklich konstant, wenn die Grösse der Aenderung variiert wird, vorausgesetzt, dass diese immer sehr klein bleibt; ferner ist der Wert, wenn der magnetische Zustand sich noch nicht der Sättigung nähert, nahezu unabhängig von der Grösse der schon vorhandenen Magnetisierung und Feldstärke.“[2])

Aus seinen Versuchen geht ferner hervor, dass der Wert von $\frac{dI}{dH}$ bei cyklischer sehr kleiner Veränderung der Feldstärke bei mittlerer Magnetisierung nahezu konstant und gleich dem anfänglichen Werte ist, wenn das Probestück noch nicht magnetisiert ist. „Wird indessen die mittlere Magnetisierung gesteigert, so nimmt die Susceptibilität für solche kleine Aenderungen ab. In einem Stück von hartem Eisen verringerte eine konstant wirkende Kraft von 29 Einheiten die Suscepti-

[1]) Rayleigh, Phil. Mag. März 1887.
[2]) Ewing, l. c. § 86. p. 117.

bilität für kleine Aenderungen der Feldstärke um etwa 40 % des ursprünglichen Wertes; bei einem Stück von ausgeglühtem Eisen betrug die Verringerung für die nämliche konstante Kraft sogar mehr als 80 %.[1])

Uebertragen wir diese Ergebnisse auf unseren Fall, so ergibt sich folgendes: Der nach obiger Ueberlegung berechnete Fehler mag vielleicht für die erste Expansion gelten, für die cyklischen Druckänderungen ist er aber sicher viel kleiner, indem hier der Faktor $\frac{B_k - B_i}{H_k - H_i}$ nicht aus dem Verlaufe der Permeabilitätskurve bei H_k entnommen werden darf, sondern der Wert von $\frac{dB}{dH}$ für sehr kleine H, also im allerersten Stadium der Magnetisierung, eingesetzt werden müsste. Damit fallen aber diese Korrektionen weit unter die später zu erörternde Beobachtungsfehlergrenze. Die magnetische Verzögerung, die sich besonders bei sehr geringen Aenderungen der magnetischen Kraft bemerkbar macht,[2]) sodass unter Umständen sogar zu deren Messung die ballistische Methode versagt, würde noch eine weitere Verkleinerung der Korrektion bewirken. Da sie aber nur bei weichem Eisen gross ist, bei anderen ferromagnetischen Metallen dagegen, besonders bei zerteilten Kernen,[3]) unmerklich, möge hievon an dieser Stelle ganz abgesehen werden.

Dem gegenüber kann nun folgender Einwand gemacht werden: Die bei vorliegenden Versuchen gleichzeitig mit den cyklischen Feldstärkenänderungen auftretenden Volumenänderungen des Ringkernes können das Zustandekommen eines bestimmten konstanten Wertes für $\frac{dB}{dH}$ vereiteln; somit käme die berechnete Korrektion doch ganz, vielleicht auch nur teilweise, in Betracht. Darüber konnte nur ein entsprechender Versuch Klarheit schaffen. Dabei wurde von folgender Ueberlegung ausgegangen: Wie wir gesehen haben, ist die eine Korrektion

[1]) Ewing, l. c. § 86. p. 119 f.
[2]) Vergl. Ewing, l. c. § 88 und Ewing, Proc. Roy. Soc. Juni 1889.
[3]) Vergl. v. Helmholtz, Pogg. Ann. 83, p. 535, 1851.
Wiedemann, Elektrizität IV. p. 236 ff.

$$\delta H' = \frac{H_o \cdot w_r \cdot 0{,}006}{w_a + w_r}$$

ceteris paribus umgekehrt proportional dem Gesamtwiderstande des Primärkreises. Beobachtet man also für eine bestimmte Druckänderung die Galvanometerausschläge einmal bei grossem, dann bei kleinem Vorschaltwiderstande des Primärkreises, aber gleicher Feldstärke, so müssen die Ausschläge verschieden sein.

Es ist dabei $A = \Delta\mu \pm (\varepsilon - c)$,
$A_1 = \Delta\mu \pm (\varepsilon_1 - c)$;

A, A_1 seien die beobachteten Ausschläge bei verschiedenem Vorschaltwiderstand, aber gleicher Feldstärke,

$\Delta\mu$ reiner Druckeinfluss,

ε, ε_1 die auftretenden Fehlerausschläge durch die Temperaturänderung des Primärkreises,

c Fehlerausschlag durch Aenderung der Windungszahl pro cm, unabhängig vom Vorschaltwiderstand, wenn nur die Feldstärke dieselbe.

Ist $\Delta\mu$ bei der Expansion positiv, der statische Druck also ungünstig für die Magnetisierung, so muss der Klammerausdruck subtrahiert, im andern Falle addiert werden.

Aus $A_1 - A$ erhält man $\varepsilon_1 - \varepsilon$ als Differenz der Fehlerausschläge. Das Verhältnis $\varepsilon_1 : \varepsilon$ ist aber durch die Vorschaltwiderstände bekannt, somit der Fehler ε bestimmbar.

Der Versuch wurde bei unserem Eisenringe für die Feldstärke H = 3,7 angestellt. Der Gesamtwiderstand des Primärkreises betrug dabei 360, bezw. 62 Ohm. Im einen Falle wurde der Magnetisierungsstrom aus dem Potentiometer entnommen, während bei dem kleinen Vorschaltwiderstande die beiden Akkumulatoren benutzt wurden. Der Magnetisierungsstrom war beidemale genau gleich stark; das Ampèremeter (ohne Nebenschluss, also 1 Skalenteil = 0,001 Ampère) blieb bei plötzlichem Vertauschen der Stromquellen durch einen Doppelumschalter völlig in Ruhe. Ausserdem wurde zur Vorsicht für den Versuch die Feldstärke 3,7 gewählt, für welche der Druckeinfluss wenig von derselben abhängt. Vergl. Figur 7.

Es ergaben sich folgende Ablesungen:

	links	rechts	Mittel	links	rechts	Mittel	
α_1	13,5	14,1	13,8	16,7	17,3	17,0	200 Atmosph.
α_2	7,0	7,2	7,1	7,3	8,0	7,7	
α_3	6,3	6,5	6,4	6,4	7,0	6,7	
α_4	5,7	6,2	6,0	6,2	6,5	6,4	
α_5	5,6	5,9	**5,8**	6,0	6,4	**6,2**	
α_6	5,6	5,9	**5,8**	6,0	6,4	**6,2**	
	360 Ω			62 Ω			

Die Induktion pro Skalenteil betrug 0,56.

Die Differenz der cyklischen (fett gedruckten) Ausschläge beträgt 0,4 Skalenteile.

Nun ist nach Voraussetzung:

$$\varepsilon_1 : \varepsilon = 360 : 62$$

mithin; $\varepsilon_1 = \text{ca. } 6\ \varepsilon$.

Ferner ist: $\varepsilon_1 - \varepsilon = 5\ \varepsilon = 0{,}4$

also: $\varepsilon = \frac{0{,}4}{5} = 0{,}08$ Skalenteile.

Durch Multiplikation mit der Induktion pro Skalenteil ergibt sich der gesuchte Fehler zu:

$$\delta\ B'_{3,7} = 0{,}08 \times 0{,}56 = 0{,}045.$$

Die berechnete Korrektion beträgt für diese Feldstärke:

$$\delta\ B'_{3,7} = \text{ca. } 0{,}44,$$

ist also rund 10mal so gross als die tatsächlich in Betracht kommende.

Dieses Resultat dürfte zum grössten Teil davon herrühren, dass der „Rayleigh'sche Effekt" durch die cyklischen Dilatationen nicht wesentlich gestört wird und nur ein kleiner Bruchteil mag auf eine geringere Abkühlung der Magnetisierungswindungen, als die Beobachtung nach 20 sec. ergeben hatte, zurückzuführen sein. Dann darf aber auch der Fehler

c (Aenderung der Windungszahl pro cm) als Funktion der Hysteresis mit 10 dividiert werden.

Das gefundene Resultat gilt offenbar mit genügender Annäherung für alle Punkte der Permeabilitätskurve, an denen $\frac{dB}{dH}$ ungefähr denselben Wert hat. Im ersten flachen Teile der Permeabilitätskurve fällt der berechnete Fehler schon unter die Beobachtungsfehlergrenze. Für spätere Stellen nahe der Sättigung ist aber der erschütterungsartige Einfluss einer Expansion allgemein kleiner, ausserdem der „Rayleigh'sche Effekt" grösser, sodass die angegebene Verkleinerung der Korrektion für alle Punkte als erlaubt anzusehen ist, und somit diese unter die Beobachtungsfehlergrenze fällt.

Da der „Rayleigh'sche Effekt" aber nicht nur für ganz weiches, sondern auch für hartes Eisen gilt, der Ring Fe_1 aus zerteiltem Eisen aber noch als mässig weiches Eisen anzusehen ist, dürfen diese Beobachtungen auch auf ihn übertragen werden. In wie weit die Resultate bei den anderen Ringen durch diese Korrektion beeinflusst werden, wird bei der Diskussion des Druckeinflusses auf die verschiedenen Toroïde gezeigt werden.

ad 3.

Die Sekundärwicklung der Ringe umschliesst ausser dem Ringkörper noch einen kleinen Luftraum. Streng genommen, müsste aus der Grösse desselben und der jeweiligen Feldstärke die Anzahl der in diesem „schädlichen Raume" verlaufenden Kraftlinien berechnet und von der dadurch zu gross gemessenen Induktion im Ringe abgezogen werden. Doch ist dieser Fehler um so kleiner, je enger die Sekundärwindungen den Ringkörper umschliessen und darf hier füglich ausser Acht gelassen werden. Ganz unberücksichtigt kann die Aenderung der Grösse dieses Luftraumes durch die Druckentspannungen bleiben.

Die Sekundärwicklung unterliegt ferner bei plötzlicher Expansion ebenfalls einer gewissen Abkühlung und damit Widerstandsänderung. Doch ist diese im Vergleich zum ge-

samten Sekundärwiderstande minimal und konnte unmöglich die Galvanometerausschläge irgendwie beeinflussen.

Die einzige Störung des Sekundärsystemes bei Druckentspannung könnten dadurch hervorgerufene Thermoströme verursachen, doch wurden diese, soweit überhaupt vorhanden, durch Kommutieren des Magnetisierungsstromes und Beobachten der Ausschläge nach beiden Seiten eliminiert.

Vielleicht ist es angezeigt, an dieser Stelle die Genauigkeit der beobachteten Werte durch Diskussion der Beobachtungsfehlergrenze zu bestimmen. Die Volumenkorrektion möge bei der Betrachtung der Druckeinflusskurven einzeln erörtert werden.

Die Aenderung ΔB der Induktion B bei Druckänderung wird gefunden durch Multiplikation des beobachteten Ausschlages mit der berechneten Induktion pro Skalenteil und qcm. Die Ablesungsgenauigkeit der Ausschläge betrug durch Schätzung $^1/_{10}$ Skalenteil, der Ablesungsfehler wäre somit für kleine Ausschläge von 5—10 Skalenteilen 2—$1\,^0/_0$, für grössere entsprechend kleiner. Da aber immer von mehreren cyklischen Ausschlagswerten das Mittel genommen wurde, dürfte dieser Fehler auch für kleine Ausschläge kleiner als $1\,^0/_0$ sein.

Grösser ist leider der mögliche Fehler bei der Berechnung der Induktion pro Skalenteil und qcm. Allgemein gilt dafür die Formel:

$$\beta = \frac{4\pi n \cdot f \cdot N_s \cdot i}{q \cdot N_r \cdot \alpha};$$

dabei bedeutet:

n Windungszahl pro cm auf der Eichspule,
f von der Primärwicklung derselben eingeschlossene Fläche,
N_s Zahl der Sekundärwindungen auf der Eichspule,
i in der Eichspule verwendete Stromstärke in Weber,
α den dabei am Galvanometer abgelesenen Ausschlag,
q Ringquerschnitt in qcm,
N_r Sekundärwindungszahl am Ring.

Für die Windungszahl pro cm ergab die Ausmessung 10,40 Windungen. Durch nicht ganz gleichförmige Wickelung

bezw. durch wechselnde Dicke der Umspinnung ergaben Messungen an verschiedenen Stellen Unterschiede von $\pm$ 0,02 Windungen pro cm.

Die von den Windungen eingeschlossene Fläche f wurde durch Messen des Umfanges der Glasröhre an mehreren Stellen und Mitteln der Werte bestimmt. Zum Radius der Glasröhre musste noch der halbe Durchmesser des Primärdrahtes, mit Umspinnung gemessen, addiert werden.[1]) Der maximale Fehler, der bei der Bestimmung des „wirksamen" Radius durch ungleiche Dicke der Isolation, grössere oder kleinere Spannung des aufgewickelten Drahtes und Fehler bei der Bestimmung des Umfanges hereinspielen konnte, wurde zu $\pm$ 0,02 cm angenommen. Die berechnete Fläche ergab $f = 9{,}43$ qcm.

Als Ablesungsfehler am Ampèremeter (ohne Nebenschluss) wurde als obere Grenze unter Berücksichtigung der dem Instrumente beigelegten Korrektionstabelle $\pm$ 0,0002 Ampère angenommen.

Der Ausmessungsfehler der Ringquerschnitte bei Anwendung von Mikrometerschraube und Fühlhebel wurde mit $\pm$ 0,01 qcm für einen durchschnittlichen Ringquerschnitt von 0,4 qcm angesetzt.

Der durchschnittliche Ausschlag des Galvanometers bei Einschaltung von 0,017 Ampère in die Eichspule betrug 30 Skalenteile, wobei als möglicher Ablesungsfehler 0,2 Skalenteile angenommen wurden.

Endlich wäre noch an Fehler bei der Ablesung des Druckes durch Ungenauigkeit des Manometers zu denken. Ein Vergleich des Instrumentes mit einem von Dr. E. Wagner[2])

[1]) Vergl. Heydweiller, elektrische Messungen, p. 170.

[2]) Dr. E. Wagner, Ann. d. Phys. 15. p. 906 ff. 1904.

Für die Druckversuche bei Eisen sowie dem Nickelringe N_2 gelangte ein Manometer zur Verwendung, das der Genfer Pumpe beigegeben und von Dr. E. Wagner geeicht war. Da dieses Instrument durch Platzen der Bourdon-Lamelle unbrauchbar ward, wurde für die folgenden Versuche ein Manometer von Schäffer und Budenberg in Magdeburg bezogen und mit dem Normalmanometer verglichen. Das Genfer Manometer war in Atmosphären (nicht $\frac{kg}{qcm}$, wie das Magdeburger) geeicht, doch ist die Differenz bei dem winzigen Druckeinflusse auf diese 3 Ringe belanglos.

geeichten Normalmanometer ergab jedoch nur belanglose Differenzen.

Berechnet man unter Ansetzen der genannten Grössen den Fehler der Induktion pro Skalenteil und qcm, so ergibt sich ein Maximalfehler von $\pm$ 6,7%, unter Hinzurechnung etwaiger Ablesungsfehler am Galvanometer ca. 7%. Der wahrscheinliche Fehler beträgt dann 3,6%.

IV. Ergebnisse.

A) Eisen.

Betrachten wir zunächst den Druckeinfluss auf Eisen. Figur 7 zeigt die Wirkung auf den weichen Eisenring Fe_2.[1]) Die punktierte Linie gibt die beobachteten Werte für 300 Atmosphären wieder, während die ausgezogenen Kurven den wahren Druckeinfluss nach Abzug der Volumenkorrektion darstellen. Um die Figur nicht undeutlich zu machen, wurde nur für 300 Atmosphären der unkorrigierte Wert eingezeichnet. Die Volumenkorrektion wurde hier nicht aus dem Elastizitätsmodul und dem Poisson'schen Koëffizienten in der früher gezeigten Art berechnet, sondern mittels des Kompressibilitätskoëffizienten

$$|\varkappa| = \frac{1}{v}\,\frac{dv}{dp}$$

nach den Untersuchungen von Grüneisen[2]) ausgewertet. Folgende Tabelle stellt die in Figur 7 graphisch dargestellten Werte zusammen:

[1]) Einige Worte mögen über seine Herstellung näheren Aufschluss geben. Von einem weichen Eisenstab wurde ein entsprechendes Stück abgestochen und der Ring daraus gedreht. Nach der Bearbeitung, die ihm vielleicht wieder einen gewissen Härtegrad gegeben hatte, wurde er mit Asbest dicht umwickelt, nochmals in Holzkohlenfeuer geglüht und in der Asche langsam erkalten gelassen. Darauf wurde er von der geringen entstandenen Oxydschicht durch Abschleifen mit feinem Schmiergelpapier befreit und in der beschriebenen Weise bewickelt.

[2]) E. Grüneisen, Ann. d. Phys. (4) 25. p. 825 ff. 1908.

H	$-\Delta B_{300}$	C_{300}	$-\Delta B_{200}$	C_{200}	$-\Delta B_{100}$	C_{100}
1,0	1,26	0,14				
1,5	2,80	0,36	1,81	0,24	0,94	0,12
2,0	3,70	0,60				
2,7	4,70	0,83	2,97	0,56	1,54	0,28
3,6	5,06	1,04				
5,0	4,95	1,26	3,52	0,84	1,76	0,42
7,0	4,80	1,44				
8,8	4,35	1,54	2,86	1,02	1,54	0,51
10,9	3,75	1,63				
12,7	3,46	1,68	2,26	1,12		
15,8	2,97	1,74			1,04	0,58
19,4	2,65	1,78	1,76	1,18		
25,0	2,20	1,84				
29,6	2,04	1,88	1,38	1,26	0,71	0,63

$\varkappa = 0{,}61 \times 10^{-6}$;

C bedeutet die Korrektion durch die Volumenänderung des Ringes. Ihr Wert ergibt sich aus der Formel: $C \frac{dq}{q} \times B$.

Die bezüglich Volumenänderung unkorrigierten Zahlen können, wie wir gesehen haben, höchstens um $\pm 7\%$ ihres jeweiligen Wertes fehlerhaft sein. Dazu kommt allerdings noch bei dem wahren Druckeinflusse ein eventueller Fehler durch Ungenauigkeit des Kompressibilitätskoëffizienten.

Wie ersichtlich, erreicht der statische allseitige Druckeinfluss für ganz weiches Eisen bei kleinen Feldstärken, die ungefähr dem steilsten Verlaufe der Permeabilitätskurve entsprechen, rasch ein ausgesprochenes Maximum, um dann mit höheren Feldstärken allmählich wieder kleiner zu werden und für nahezu gesättigtes Eisen asymptotisch dem Werte Null

zuzustreben.[1]) Der Einfluss auf das magnetische Moment ist proportional dem angewendeten Drucke — die Ordinaten für gleichbleibendes H verhalten sich wie die Drucke — und bewirkt eine Verkleinerung der Permeabilität.

Der Ring Fe_1, aus geglühtem Blumendrahte gewickelt, ergab eine ganz andere Einwirkung von allseitigem Druck. Die in folgender Tabelle zusammengestellten Werte sind in Figur 8 eingezeichnet.

H	$-\Delta B_{300}$	C_{300}	$-\Delta B_{150}$	C_{150}
3,1	1,05	0,09		
4,0	1,26	0,16		
5,7	2,10	0,39		
8,0	2,84	0,80	1,36	0,40
10,0	3,25	1,04		
12,2	3,68	1,20		
14,2	3,90	1,30	1,90	0,65
17,7	4,00	1,42		
21,6	4,10	1,52	2,10	0,76
28,0	4,00	1,62		
32,8	3,80	1,69	1,90	0,85

$\varkappa = 0{,}61 \times 10^{-6}$;

Die punktierte Kurve zeigt wieder den unkorrigierten, beobachteten Druckeinfluss, während die beiden ausgezogenen Linien den wahren Wert für 300 und 150 Atmosphären darstellen.

Das Ansteigen des Druckeinflusses erfolgt viel langsamer wie bei dem Ringe Fe_2 und nachdem ungefähr bei $H = 20$ ein flaches Maximum erreicht ist, sinkt der Einfluss allmählich

[1]) Es wäre immerhin denkbar, dass für noch höhere Feldstärken die Kurven unter die Abscisse herabsinken, d. h. der Druckeinfluss das Vorzeichen wechselt.

mit wachsendem H. Auch hier ist der Einfluss proportional dem Drucke und verkleinert die Permeabilität.

Das Maximum des statischen Druckeinflusses ist offenbar um so weniger ausgeprägt und wird um so weiter gegen höhere Feldstärken verschoben, je härter das untersuchte Eisen ist. (Vergleiche Figur 6, Figur 7 und Figur 8.) Der Grössenordnung und der Art der Kurven nach zeigen die Ergebnisse dieses Ringes gute Uebereinstimmung mit den Resultaten von Honda und Nagaoka[1]), wenn dieselben auf $J\,B$ umgewertet werden. Nur verlaufen ihre Kurven noch etwas flacher und scheinen erst bei $H = 50$ ein Maximum zu erreichen. Vergleicht man aber ihre Tabellen über die Permeabilität des verwendeten Stückes, so findet man eine noch grössere Härte des Probestückes als die des hier verwendeten Eisens, sodass obige Behauptung berechtigt erscheint.

Offenbar ist also bei Eisen die Art des allseitigen Druckeinflusses stark von der Permeabilität des untersuchten Stückes abhängig und wird um so monotoner, je härter das Eisen.

B) Nickel.

Der Nickelring Ni_2 wurde ebenfalls in zerteilter Form untersucht, d. h. aus hartem Rein-Nickeldraht (von Hartmann & Braun bezogen) etwa 0,5 mm stark, gewickelt. Infolge der grossen Elastizität dieses Drahtes musste er auf der Drehbank in eine entsprechende Holznute aufgespult werden, während bei dem geglühten Eisendraht das Wickeln des Ringes mit der Hand geschah. Figur 6, Kurve Ni_2 zeigt die Permeabilitätskurve. Bemerkenswert ist dabei der ungemein flache Verlauf bis zu mittleren Feldstärken (etwa $H=12$), dann das scharfe plötzliche Ansteigen und schliesslich als drittes Stadium wieder ein langsames Steigen bis zur Sättigung. Diese Art der Permeabilität zeigt auffallende Aehnlichkeit mit den Resultaten, welche Nagaoka[2]) bei der magnetischen Untersuchung

[1]) K. Honda und H. Nagaoka, Phil. Mag. 46. p. 261 ff. 1898.
[2]) Nagaoka, Journ. Coll. Science, Imp. Univ. Japan, 2, p. 304. Ferner Ewing, l. c. § 141.

von Nickeldrähten, die gleichzeitig Zug und Torsion unterworfen waren, erhielt. Offenbar waren beim Wickeln des Ringes derartige elastische Deformationen im Spiele gewesen, die sich nun in der Permeabilität äusserten. Trotzdem wurde der allseitige Druckeinfluss auf diesen Ring untersucht, wenn auch die Werte kein Bild des reinen hydrostatischen Druckeinflusses auf Nickel geben können. Dabei wurde folgende Tabelle und Figur 9 erhalten:

H	$-\Delta B_{300}$	C_{300}
13,6	0,70	0,15
16,7	0,96	0,24
20,8	1,12	0,27
26,5	1,24	0,29
31,3	1,24	0,30

$\varkappa = 0{,}56 \times 10^{-6}$;

Die punktierte Kurve zeigt den beobachteten, die ausgezogene den wahren Druckeinfluss. Im Anschluss an Grüneisen[1]) wurde der Kompressibilitätskoëffizient $\varkappa$ für Nickel zu $0{,}56 \times 10^{-6}$ angenommen. Vor Feldstärke 12 konnte überhaupt nicht beobachtet werden und nur bei 300 Atmosphären Druckänderung waren messbare Ausschläge zu erhalten. Interessant ist, dass, während allseitiger Druck analog der Wirkung einseitiger Deformation bei Nickel sonst entgegengesetzten Einfluss zeigt wie bei Eisen[2]), hier die hydrostatische Kompression dasselbe Vorzeichen in der Wirkung aufweist. Aus den Versuchen von Honda u. Nagaoka[3]) über Volumenänderung durch Magnetisierung geht allerdings hervor, dass bei Nickel unter Umständen sowohl Vergrösserung als Verkleinerung seines Volumens dabei eintreten kann. Es hängt dies eben

[1]) E. Grüneisen l. c.
[2]) Vergl. K. Honda u. H. Nagaoka, Phil. Mag. 46. p. 261 ff. 1898.
[3]) K. Honda u. H. Nagaoka. Phil. Mag. 49. p. 334 f. 1899, sowie 4. p. 57 ff. 1902.

mit der chemischen Beschaffenheit, sowie der Vorbehandlung des Probestückes zusammen. Ein analoges Verhalten des Nickels bei allseitigem Druck wäre immerhin denkbar.

Es war wünschenswert, noch einen zweiten Nickelring zu untersuchen und es wurde daher ein massiver Ring aus Rein-Nickel von der Vereinigte Deutsche Nickelwerke-Aktiengesellschaft in Schwerte mit den erforderlichen Dimensionen bezogen. Dieser Ring erhielt drei Lagen Magnetisierungswindungen, da es vielleicht geboten schien, noch über 30 Einheiten der Feldstärke den Druckeinfluss untersuchen zu können, ohne den Magnetisierungsstrom zu erhöhen. Seine Permeabilitätskurve Figur 6, Kurve Ni_1 zeigt weichen Nickel an.

Der hydrostatische Druck hat bei diesem Nickel den zu erwartenden Einfluss, d. h. die Permeabilität wird im komprimierten Zustande grösser. Bei der Expansion erhielt ich daher negative Ausschläge, d. h. nach der Seite, die einer Verminderung der Induktion im Ringe entsprach. Allerdings waren nur die cyklischen Ausschläge nach dieser Seite hin gerichtet; die erstmaligen, entsprechend den erschütterungsähnlichen Wirkungen dieser Dilatationen, ergaben bei allen Feldstärken positive Zahlen.

Leider war auch bei diesem Nickelringe der Druckeinfluss so gering, dass nur bei dem höchsten Drucke (300 Atmosphären) noch sicher beobachtet werden konnte. Ein Versuch über die Grösse des früher besprochenen Rayleigh'schen Effektes konnte füglich auch nicht angestellt werden, sodass nicht zu ermitteln war, um welchen Betrag der Fehler durch Feldstärkenänderung infolge Druckentspannung gegenüber seiner berechneten oberen Grenze verkleinert wurde. Nimmt man eine fünffache Verkleinerung an (bei Eisen war die Verkleinerung zehnfach) so fällt diese Korrektion schon unter die, hier ohnehin wegen der kleinen Ausschläge etwas höhere Beobachtungsfehlergrenze.

Die Korrektion wegen Volumenänderung musste hier, entsprechend dem umgekehrten Sinne des Druckeinflusses, zu den beobachteten Werten addiert werden. Folgende Tabelle, sowie Figur 10 geben ein Bild der erhaltenen Werte:

H	$+\Delta B_{300}$	C_{300}
3,4	0,47	0,06
4,6	0,51	0,08
9,3	0,74	0,17
12,0	0,78	0,21
17,0	0,74	0,28
21,0	0,58	0,31
26,0	0,39	0,35
32,2	0,19	0,39
39,4	0,12	0,42

$\varkappa = 0{,}56\times10^{-6}$;

Für $\varkappa$ wurde der Wert $0{,}56\times10^{-6}$ eingesetzt. Der statische Druckeinfluss steigt zuerst langsam bis etwa $H=15$ an, und fällt dann wieder, sich asymptotisch mit höheren Feldstärken der X Axe nähernd. Das Vorzeichen des Druckeinflusses stimmt mit den diesbezüglichen Beobachtungen von Honda und Nagaoka[1]) überein. Während diese aber für ihr Nickel-Probestück grössere Aenderung des magnetischen Momentes als bei Eisen fanden, ist hier der Einfluss kleiner. Da jedoch, wie schon erwähnt, sogar das Vorzeichen für Nickel bei Magnetostriktion nicht immer eindeutig ist, ist die zahlenmässige Abweichung vorliegender Resultate von den erwähnten Untersuchungen leicht erklärlich.

C) Nickelstahl.

Am interessantesten war der Einfluss allseitigen Druckes auf die Magnetisierung von Nickelstahl mit verschiedenem Prozentgehalte von Nickel. Bei der Auswahl des prozentualen Nickelgehaltes liess ich mich durch die Versuche von Honda und Nagaoka[2]) über Magnetostriktion von Nickelstahllegierungen leiten. Für Legierungen mit grosser Volumenänderung bei Magnetisierung stand auch ein entsprechend grosser all-

[1]) K. Honda und H. Nagaoka, Phil. Mag. 46, p. 261 ff. 1898.
[2]) K. Honda und H. Nagaoka, Phil. Mag. 4, p. 45 ff. 1902.

seitiger Druckeinfluss zu erwarten. An erster Stelle steht nach ihren Versuchen Nickelstahl mit 29% Nickel, dann 36% und schliesslich 42% Nickel. Für 25% Nickelstahl konnten sie nur unmerkliche Volumenänderung finden, indem dieses Material bei gewöhnlicher Temperatur fast gänzlich unmagnetisch ist. Bemerkenswert ist, dass für die Längsänderungen bei Magnetisierung genau die umgekehrte Reihenfolge im Nickelgehalte sich ergab.

Der Nickelstahl für vorliegende Versuche wurde von der Société Genevoise in Genf bezogen, und zwar erhielt ich Stücke mit 42%, 36%, 30,20% sowie 26,84% Nickel. Das Material mit 42% und 36% Nickel wurde gleich in Gestalt der gewünschten Ringe geliefert, während vom 30,20% und 26,84% Nickelstahl zwei Barren mit quadratischem Querschnitte bezogen und die Ringe vom hiesigen Institutsmechaniker daraus gedreht wurden Alle 4 Ringe erhielten drei Lagen Magnetisierungswindungen.

Zuerst wurde der Ring mit 42% Nickel untersucht. Seine Permeabilität zeigt Figur 11. Sie unterscheidet sich nicht viel von der des weichen Eisens. Eine Untersuchung hinsichtlich der Permeabilität vor und nach den Druckversuchen ergab keinerlei Unterschied.*)

Da es wünschenswert schien, den magnetischen Temperaturkoëffizienten des jeweils untersuchten Nickelstahles zu kennen, wurden die Ringe vor dem Einbau in den Druckcylinder in einem Paraffinölbad, das auf verschiedene Temperaturen gebracht werden konnte, daraufhin geprüft. Figur 12 zeigt die Abhängigkeit der Permeabilität von der Temperatur bei dem 42% Nickelstahl für 0°, 20° und 57°. Erwärmung wirkt, ähnlich wie bei weichem Eisen, bis zur Feldstärke 10 auf die Magnetisierung günstig, um von da ab die Permeabilität zu verkleinern. Bei $H=10$ liegt also in Bezug auf Temperatureinwirkung ein „Villarischer Punkt“. In Figur 13 sind die aus folgender Tabelle für den statischen Druckeinfluss entnommenen Zahlen graphisch dargestellt:

*) Ebensowenig trat ein Unterschied bei den drei anderen Nickelstahl-Probestücken auf.

H	$-\Delta B_{300}$	C_{300}	$-\Delta B_{200}$	C_{200}	$-\Delta B_{100}$	C_{100}
1,2	+ 0,09	0,07				
1,9	0,00	0,12				
2,7	− 0,36	0,19	0,25	0,12		
3,6	1,40	0,30	1,00	0,20		
4,9	5,00	0,73	3,60	0,48	1,70	0,24
7,0	8,60	1,12	5,90	0,74		
9,8	10,80	1,40	7,20	0,94		
15,8	12,50	1,68	8,60	1,12	4,30	0,56
22,1	13,50	1,82	9,40	1,20		
27,1					4,70	0,66
34,7			9,90	1,33		
40,7	14,80	2,00	10,00	1,35	5,00	0,67

E 16000 ;[1]

μ 0,3 ;

Zur Berechnung der Volumenkorrektion wurden die von Guillaume[1]) beobachteten Werte des Elastizitätsmoduls berücksichtigt. Für den Poisson'schen Koëffizienten μ wurde die Zahl 0,3 angenommen. Dadurch entsteht in der Berechnung der Volumenkorrektion eine Unsicherheit, doch ist bei diesem Material der Druckeinfluss bedeutend stärker als bei den bisher betrachteten Metallen, sodass diese Unsicherheit wenig ins Gewicht fällt. Nimmt man z. B. die Volumenkorrektion nur auf $\pm$ 20 % genau an, so wäre der dadurch bedingte Maximalfehler der korrigierten Kurve etwa $\pm$ 3 %. Ferner ist zu untersuchen, in wie weit hier der Fehler durch Abkühlung

[1]) Ch. — E'd. Guillaume, Les Applications des aciers au Nickel. Paris 1904.

Nickelgehalt	E in $\frac{\text{Tonnen}}{\text{qmm}}$
26,2 %	18,54
27,9 %	18,06
30,4 %	15,96
35,0 %	15,04
44,5 %	16,40

der Magnetisierungswindungen bei Expansion hereinspielt, bezw. in wie weit derselbe durch den Rayleigh'schen Effekt verkleinert wird. Dazu war eine experimentelle Bestimmung dieser Verkleinerung, ähnlich wie bei Eisen, nötig. Vergl. Seite 36f. Es ergab sich eine vierfache Verringerung des berechneten Fehlers. Der Versuch wurde bei diesem Ring für zweierlei Feldstärken angestellt und zwar wurde das eine mal ein grösserer Vorschaltwiderstand, als gewöhnlich, benutzt. Die Verkleinerung war in grosser Annäherung dieselbe, d. h. die Verkleinerung durch den Rayleigh'schen Effekt bleibt für annähernd dieselben Werte von $\frac{dB}{dH}$ nahezu konstant.

Nun sind die berechneten Fehler durch Feldstärkenänderung bei Druckänderung allerdings hier so bedeutend, dass sie auch durch Division mit 4 noch nicht genügend weit unter die Beobachtungsfehlergrenze fallen. Die grösste Fälschung des beobachteten Druckeinflusses kann dadurch noch rund $3\,^0/_0$ betragen. Der Maximalfehler der unkorrigierten Kurve beträgt also rund $3\,^0/_0 + 7\,^0/_0{}^*) = 10\,^0/_0$, der wahrscheinliche Fehler etwa $4\,^0/_0$.

Betrachten wir nun die Wirkung des hydrostatischen Druckes auf das magnetische Moment. Dieser Nickelstahl war übrigens das einzige Metall, bei dem sich die erstmaligen Einwirkungen einer Druckentspannung nur wenig von den cyklischen unterschieden.

Die punktierte Kurve zeigt den beobachteten Druckeinfluss, während die ausgezogenen Kurven die korrigierten Werte wiedergeben. Von $H = 3$ an bewirkt allseitiger Druck eine rasche Abnahme der Permeabilität, die mit wachsender Magnetisierung bis zu den höchsten verwendeten Feldstärken noch langsam weiter schreitet. Die Abnahme ist fast proportional dem Drucke. Bei kleineren Feldstärken als 3 Einheiten scheint der Druckeinfluss entgegengesetztes Vorzeichen zu besitzen, doch war wegen der zu kleinen Ausschläge eine diesbezügliche Beobachtung nur bei 300 Atmosphären, und auch da nur ungenau möglich.

*) $7\,^0/_0$ = Beobachtungsfehlergrenze.

Als zweites Probestück wurde der 36 % Nickelstahl untersucht. Seine Permeabilität ergibt sich aus Figur 11. Bis $H = 7$ wächst B fast proportional der Magnetisierung und steigt dann etwas steiler an; die Sättigung scheint erst bei hohen Feldstärken einzutreten. Die Kurve hat Aehnlichkeit mit der Permeabilitätskurve von weichem Nickel. Der Temperatureinfluss ist durch Figur 14 für 0^0, 20^0 und 56^0 gegeben. Erwärmung ist bis zu 36 Einheiten der magnetischen Kraft günstig, während bei dem 42 % Ring der „Villarische Punkt" schon bei H = 10 lag.

Folgende Tabelle, sowie Figur 15 zeigen den Druckeinfluss auf diesen Nickelstahl:

H	$+\Delta B_{300}$	C_{300}	$+\Delta B_{200}$	C_{200}	$+\Delta B_{100}$	C_{100}	
5,0	1,20	0,03	0,75	0,02			
7,1	1,70	0,05	1,10	0,03			
9,7	2,41	0,07	1,70	0,05	0,85	0,02	E 15000 ;
12,7	3,90	0,14	2,68	0,09			μ 0,3 ;
15,6	5,92	0,24	4,00	0,16	2,00	0,08	
18,2	7,50	0,30	4,95	0,20			
22,1	8,70	0,38	5,80	0,25	3,01	0,13	
27,3	9,40	0,46	6,38	0,30			
34,7	9,68	0,54	6,70	0,38			
41,0	9,20	0,60	6,50	0,40	3,30	0,20	

Das Resultat ist insofern überraschend, als der Druck hier das magnetische Moment vergrössert, während bei dem 42 % Nickelstahl (also nur 6 % Unterschied im Nickelgehalte[1]) die Permeabilität fast ebensoviel verkleinert wurde. Es ist daher zu vermuten, dass für eine bestimmte Legierung zwischen 36 % und 42 % Nickel der Druckeinfluss verschwindet,[1]) wenigstens bei den vorliegenden Feldstärken.

[1]) Wie wir später sehen werden, dürfte eine derartige Legierung auch zwischen 30 % und 36 % existieren.

Entsprechend dem Verhalten von Nickel gingen die Ausschläge des Galvanometers bei der ersten Expansion nach rechts, eine Vermehrung der Induktion andeutend, während sie beim Cyklischwerden des Vorganges nach der entgegengesetzten Seite wanderten. Diese Erscheinung war bis zur Feldstärke 24 zu beobachten. Von da ab wechselte das Vorzeichen des Ausschlages nicht mehr, indem hier, näher der Sättigung, der statische Druckeinfluss die erschütterungsähnlichen Einflüsse bereits überwiegt.

Der beobachtete, also unkorrigierte Druckeinfluss für 300 Atmosphären ist durch die punktierte Kurve angedeutet; die ausgezogenen Linien zeigen die korrigierte Wirkung von 300, 200 und 100 Atmosphären Druck.

Der Fehler infolge der Druckeinwirkung auf die Magnetisierungswindungen ist bei diesem Ringe, entsprechend dem flachen Verlaufe der Permeabilitätskurve und der daraus folgenden Kleinheit des Ausdruckes $\frac{B_k - B_i}{H_k - H_i}$ für alle Feldstärken klein. Nimmt man dazu noch ein geringes Zustandekommen des Rayleigh'schen Effektes an, so fällt der Fehler genügend weit unter die Beobachtungsfehlergrenze. Die Volumenkorrektion ist ebenfalls, entsprechend der schwachen Magnetisierung, geringfügig, und bewirkt ein Fehler von $20\,^0/_0$ bei ihrer Bestimmung maximal nur $\pm\, 1\,^0/_0$ Ungenauigkeit des korrigierten Wertes. Sie muss zu den beobachteten Werten addiert werden. Die Fehlergrenze beträgt also im ungünstigsten Falle $7\,^0/_0 + 1\,^0/_0 = 8\,^0/_0$, der wahrscheinliche Fehler noch nicht $4\,^0/_0$.

Der Druckeinfluss steigt zuerst proportional der Feldstärke bis etwa $H = 10$, nimmt dann rascher zu, erreicht bei $H = 34$ ein flaches Maximum und nimmt mit höheren Feldstärken wieder etwas ab. Die Aenderung der Permeabilität ist dem Drucke ziemlich proportional.

Das interessanteste Verhalten zeigte der Nickelstahl mit $30{,}20\,^0/_0$ Nickel. Schon bei der Untersuchung seiner Permeabilität nach der Kommutationsmethode trat eine merkwürdige Erscheinung auf. Von einer gewissen Feldstärke an wurden die Galvanometerausschläge bei plötzlichem Kommutieren des

Magnetisierungsstromes mit wachsendem H wieder kleiner, woraus zu schliessen wäre, dass die Induktion von diesen Feldstärken an nicht mehr zunimmt, sondern mit wachsender Magnetisierung kleiner wird, was natürlich unmöglich. Die Ursache wurde vielmehr in einem sehr grossen magnetischen Temperaturkoëffizienten gesucht, der schon bei der geringen Erwärmung der Magnetisierungswindungen durch den Strom und damit des Ringkörpers störend in Tätigkeit trat. Die experimentelle Untersuchung bestätigte diese Erwartung. Figur 11 zeigt die Permeabilitätskurve für 21°, Figur 16 für 0°, 21° und 55°.

Die Einwirkung der Temperatur ist in der Tat im Vergleich zu den bisher beobachteten Temperaturkoëffizienten eine ganz ausserordentlich grosse. Die Permeabilität ist für 0° rund 7 mal so gross als für 55°. Ein „Villarischer Punkt" ist bei diesen Temperaturen und Feldstärken nicht vorhanden, die Erwärmung verkleinert die Magnetisierung stets. Bei 55° war das Metall nur mehr sehr schwach magnetisch, eine Tatsache, die auf eine tief gelegene „kritische Temperatur" schliessen lässt.

Mit Rücksichtnahme auf den grossen Temperaturkoëffizienten wurde für die Ablesungen bei höheren Feldstärken der Magnetisierungsstrom nur so kurz wie möglich eingeschaltet, schnell beobachtet und der Strom sofort wieder für längere Zeit unterbrochen.

Die Permeabilität erreicht bei diesem Probestück für Zimmertemperatur und Feldstärken nahe der Sättigung keinen so hohen Wert wie bei dem 36 % Nickelstahl. Dagegen ist sie für schwache Magnetisierungen bedeutend grösser. Bei $H = 18$ schneiden sich die beiden Kurven, Figur 11.

Der starke Temperatureinfluss liess auch bedeutenden Einfluss allseitigen Druckes erwarten. In der Tat ergaben orientierende Vorversuche darüber eine so grosse Einwirkung desselben auf das magnetische Moment — es musste deshalb in das Sekundärsystem, das bislang immer ohne jeden Vorschaltwiderstand blieb, ein Ballastwiderstand eingeschaltet werden, um die Galvanometerausschläge zu reduzieren, — dass der Gedanke nahe lag, den Druckeinfluss hier aus der

Differenz zweier Permeabilitätsmessungen bei Atmosphärendruck und bei erhöhtem Druck zu berechnen. Leider konnte damit kein brauchbares Resultat erzielt werden, indem es sich als unmöglich herausstellte, den Ring längere Zeit auf ganz konstanter Temperatur zu halten. Kleine Temperaturunterschiede bewirkten aber bereits bedeutende Permeabilitätsdifferenzen. Selbst wenn es aber gelungen wäre, Temperaturgleichgewicht für längere Zeit im Zylinder zu wahren, so schien es doch geboten, durch Einschalten von kleinem Ballastwiderstand bei den Permeabilitätsmessungen die Induktion pro Skalenteil herabzudrücken, um grosse Ausschläge und damit merkliche Differenzen derselben für kleine Permeabilitätsänderungen zu erreichen. Dadurch entstand aber wieder eine Fehlerquelle, indem dann weder Gleichheit der Ausschläge nach beiden Seiten, noch Proportionalität derselben mit dem Strome vorhanden war. Diese Differenzen waren aber von derselben Grössenordnung wie die durch den Druckeinfluss bedingten.

Ich zog es deshalb vor, doch die bisher angewandte Methode einer raschen Expansion zu verwenden. Allerdings spielt auch hier der magnetische Temperaturkoëffizient herein, indem erstens der Ringkörper bei der adiabatischen Entspannung sich um einen gewissen Betrag abkühlt, ferner auch bei diesen Versuchen der Ring nicht auf völlig konstanter Temperatur gehalten werden konnte.

Was die Abkühlung des Ringkörpers betrifft, so beträgt diese bei Druckänderung von 300 Atmosphären etwa $0{,}3^0$. Der dadurch hervorgerufene Fehler würde ca. 18 Kraftlinien pro qcm betragen. Um diesen wären die Resultate für 300 Atmosphären zu gross und zwar für jede Feldstärke, da kein Villarischer Punkt des Temperatureinflusses vorhanden. Nun kommt aber der cyklische Einfluss einer solchen Temperaturänderung in Betracht, d. h. der Fehler wird sicher viel kleiner.

In wie weit ferner eine Inkonstanz der Temperatur während der Druckversuche fehlerhaft wirken konnte, wurde experimentell untersucht. Bei $H = 12$ wurde der cyklische Druckeinfluss einmal bei der Temperatur von 19^0, dann bei

14° beobachtet. Die Permeabilität unterschied sich dabei um rund 20%. Dagegen war der Druckeinfluss in beiden Fällen in grosser Annäherung derselbe, sodass Temperaturschwankungen von 0,5 bis 1°, wie sie während der Druckversuche durch Stromerwärmung der Magnetisierungswindungen höchstens vorlagen, unberücksichtigt bleiben konnten. ΔB hängt also bei diesem Metalle bedeutend weniger von der Temperatur ab, als die Induktion B allein.

Folgende Tabelle, sowie Figur 17 zeigen den Einfluss hydrostatischen Druckes auf diesen Nickelstahl bei 19°. Die Volumenkorrektion konnte als zu gering unberücksichtigt bleiben, ebenso die Fehler durch Druckeinwirkung auf die Ringwicklung:

H	$-\Delta B_{300}$	$-\Delta B'_{300}$	$-\Delta B_{200}$	$-\Delta B_{100}$
1,4	15,4	9,0	10,0	5,0
2,2	29,5	22,5	20,8	10,7
3,0	47,5	55,0	31,0	15,4
3,9	63,0	71,0	41,5	20,5
5,0	80,0	82,0	53,0	27,0
7,0	96,0	105,0	65,0	33,0
9,5	109,0	112,0	73,0	36,0
12,3	118,0	112,0	79,0	40,0

In der 3. Kolumne ($— \Delta B'_{300}$), punktierte Kurve, wurde der Druckeinfluss probeweise aus der Differenz zweier Permeabilitätsmessungen berechnet.

Der Druckeinfluss ist im Vergleich zu den übrigen untersuchten ferromagnetischen Metallen enorm: Absolut genommen für $H = 12$ rund 120mal so gross wie bei Nickel, 60mal so gross wie bei Eisen, etwa 12mal so stark wie bei dem 42%, und ungefähr 30mal so gross als für den 36% Nickelstahl. Die ausgezogenen Kurven zeigen den Einfluss für 300, 200 und 100 Atmosphären Druck. Die Einwirkung steigt pro-

portional der Kompression und verringert das magnetische Moment.

Vergleicht man die Druckeinflusskurven der eben behandelten drei Nickelstahlprobestücke mit ihren entsprechenden Permeabilitätskurven bis zu mittleren Feldstärken, so fällt sofort eine Aehnlichkeit der „differentialen Permeabilität" $\frac{d\,B}{d\,H}$ mit dem „differentialen Druckeinflusse" $\frac{d(\Delta B)}{d\,H}$ auf. Steigt die Induktion steil an, so zeigt auch die Druckeinwirkung ein rasches Ansteigen, während einem allmählichen Wachsen der Permeabilität auch ein langsameres Steigen der Kompressionswirkung entspricht. Sogar die Wendepunkte der Permeabilität finden wir in den Druckeinflusskurven wieder und zwar fast bei denselben Feldstärken. Demnach spielen sich bei allseitiger Dilatation bezw. Kompression bereits magnetischer Metalle offenbar ähnliche molekulare Vorgänge ab wie bei der Magnetisierung selbst.

Während der 30,20% Nickelstahl noch merklich zu magnetisieren war, besitzt die Legierung mit 26,84% Nickel nur mehr sehr schwache Magnetisierbarkeit. Die Induktion steigt bis $H = 40$ proportional der magnetischen Kraft, Fig. 11 und Fig. 18. Die Permeabilität ist in diesem Feldstärkenbereich demnach konstant und beträgt etwa 1,7. Die Abhängigkeit derselben von der Temperatur ergibt sich aus Figur 18. Abkühlung bewirkt eine geringe Vergrösserung des magnetischen Momentes. Villarischer Punkt ist bis zur Feldstärke 40 nicht vorhanden.

Der Einfluss allseitiger Krompression war minimal und zahlenmässig nicht zu messen. Es ergab sich eine winzige Verkleinerung der Permeabilität bei Druck.

Zusammenfassung der Resultate.

Die Resultate vorliegender Arbeit lassen sich in folgender Weise kurz zusammenfassen:

1) Hydrostatischer Druck ändert das magnetische Moment von ferromagnetischen Metallen im allgemeinen um einen sehr geringen, immerhin messbaren Betrag.

2) Bei Eisen ist der Sinn des Einflusses negativ, d. h. das magnetische Moment nimmt bei Kompression ab. Die Art der Einwirkung ist stark von der Permeabilität des Probestückes abhängig. Je härter das Eisen, um so weniger ändert sich der Einfluss mit der Feldstärke. Der Grössenordnung nach beträgt die Aenderung der Induktion an Stelle maximaler Einwirkung bei ganz weichem Eisen (Ring Fe_2) etwa $0{,}5\,^0/_{00}$, bei härterem (Ring Fe_1) etwa $0{,}3\,^0/_{00}$ für 300 Atmosph. Druck.
3) Bei Nickel wird im allgemeinen die Permeabilität unter dem Einflusse allseitigen Druckes vergrössert; doch dürfte je nach der chemischen Beschaffenheit oder Vorbehandlung des untersuchten Stückes auch der entgegengesetzte Fall eintreten können. Bei dem untersuchten Nickel (Ring Ni_1) betrug die Induktionsänderung etwa $0{,}5\,^0/_{00}$ maximal.
4) Bei Nickelstahl variiert Grösse und Vorzeichen des Druckeinflusses stark mit dem Nickelgehalte der Legierung. Bei $36\,^0/_0$ Nickel bewirkt hydrostatischer Druck eine Vergrösserung der Permeabilität, für $42\,^0/_0$, $30{,}20\,^0/_0$ und $26{,}84\,^0/_0$ Nickel ergibt sich dabei Verkleinerung des magnetischen Momentes. Im allgemeinen ist der Einfluss bedeutender als bei Eisen und Nickel. Für die Legierung mit $42\,^0/_0$ Nickel etwa $1\,^0/_{00}$, für $36\,^0/_0$ Nickel etwa $3\,^0/_{00}$ an Stelle grösster Induktionsänderung bei 300 Atmosphären Druck. Der grösste Effekt hydrostatischen Druckes war bei der Legierung mit $30{,}20\,^0/_0$ Nickel zu beobachten, was mit dem ausserordentlichen hohen magnetischen Temperaturkoëffizienten dieses Nickelstahles in Zusammenhang stehen dürfte. Der Einfluss betrug hier bei 300 Atmosphären maximal etwa $7\,^0/_0$.

Von den Resultaten der bisherigen Arbeiten auf diesem Gebiete sind mit den vorliegenden Untersuchungen am besten die Ergebnisse von K. Honda und H. Nagaoka[1]) im Einklang. Bemerkenswert ist vor allem die Uebereinstimmung in der Grössenordnung des Einflusses, die am deutlichsten bei den Eisenringen zum Ausdruck kommt. In der Art des Einflusses ergeben sich zwar Unterschiede, die aber durch die Permea-

[1]) K. Honda u. H. Nagaoka, Phil. Mag. 46. p 261 ff. 1898.

bilitätsunterschiede der verwendeten Materialen erklärlich sind. (Vergl. darüber Seite 44 und 47.)

Dagegen steht vorliegende Arbeit sowohl, als auch die von Honda und Nagaoka in Widerspruch mit den Ergebnissen von Frisbie[1]), indem diese für Eisen einen weit grösseren Einfluss mit anderem Vorzeichen, bezw. einen „Villarischen Punkt" desselben bei relativ kleinen Feldstärken findet: in Widerspruch ferner mit den Untersuchungen Wassmuths[2]), welcher angibt, bei 10 Atmosphären Druck einen deutlichen Einfluss auf Eisen gefunden zu haben, während für 100 Atmosphären Druck nach vorliegender Arbeit die Einwirkung auf Eisen etwa $0{,}1\,^0/_{00}$ betrug. Dagegen erscheint es auf Grund dieses Ergebnisses vollkommen verständlich, dass Tomlinson[3]) behauptet, keinen merklichen Einfluss beobachtet zu haben.

[1]) F. C. Frisbie, l. c.
[2]) A. Wassmuth, l. c.
[3]) H. Tomlinson, l. c.

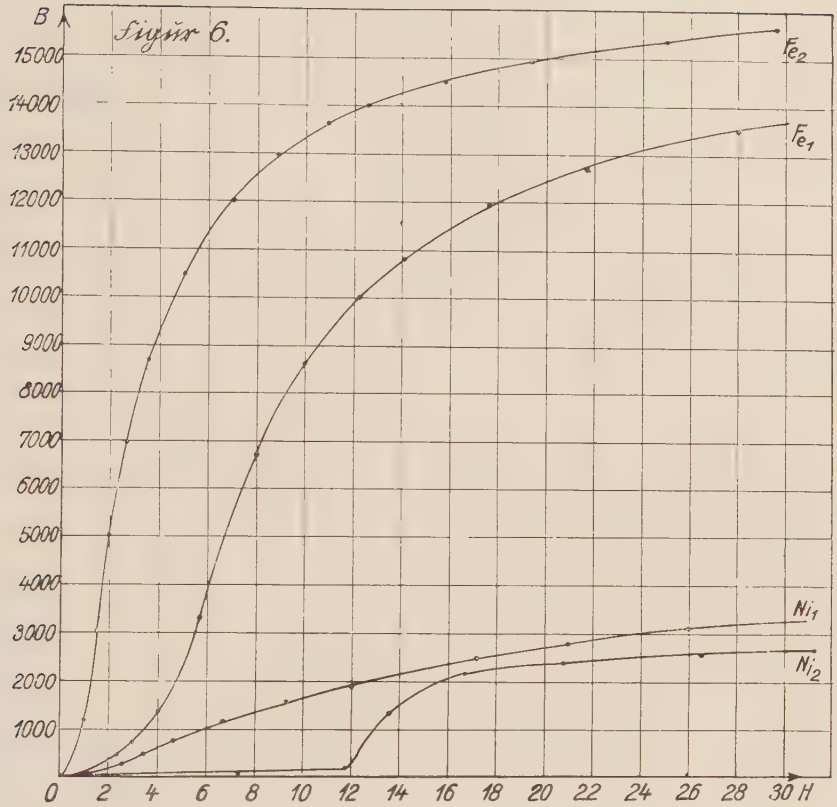
Es sei mir an dieser Stelle gestattet, meinem hochverehrten Lehrer, Herrn Geheimrat Röntgen, für die Anregung zu dieser Arbeit sowie für das grosse Interesse, das er diesen Untersuchungen entgegenbrachte, meinen wärmsten Dank auszusprechen.

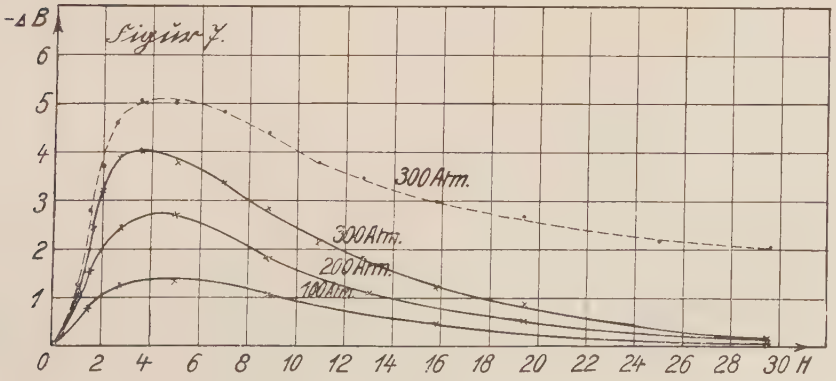
München, Mai 1909.

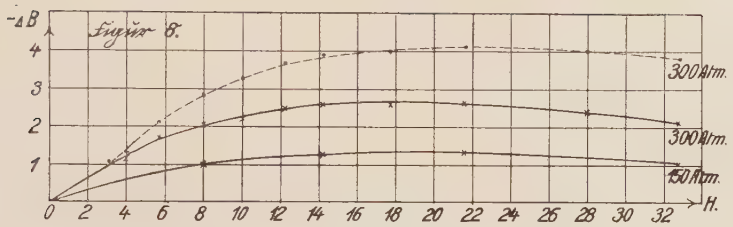
Lebenslauf.

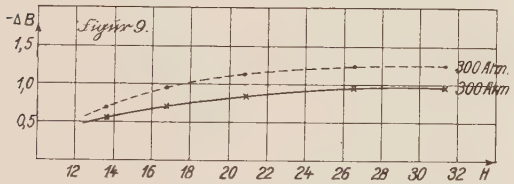
Gerhard Freiherr du Prel, der Verfasser der vorliegenden Arbeit, ist der Sohn des verstorbenen K. Hauptmannes a. D., Dr. Carl Freiherr du Prel.

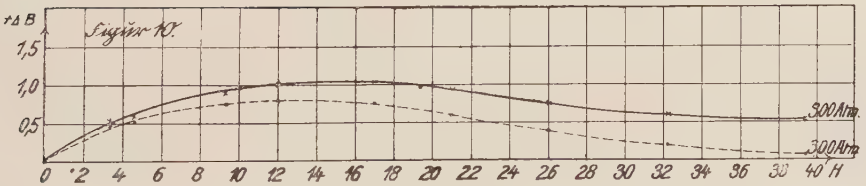
Er wurde 1882 zu München geboren und absolvierte 1901 das humanistische Wilhelms-Gymnasium in München. Dann widmete er sich dort an der Ludwig-Maximilians-Universität dem Studium der Physik.

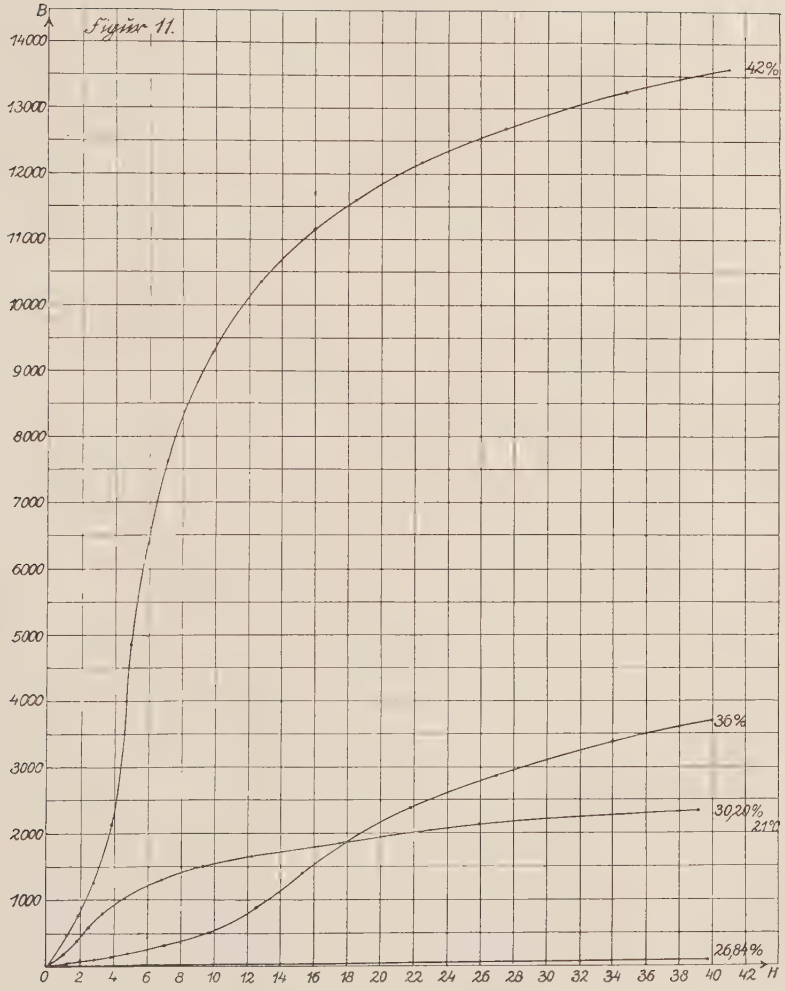

B
Figur 6.
15000
14000
13000
12000
11000
10000
9000
8000
7000
6000
5000
4000
3000
2000
1000
0 2 4 6 8 10 12 14 16 18 20 22 24 26 28 30 H
Fe_2
Fe_1
Ni_1
Ni_2

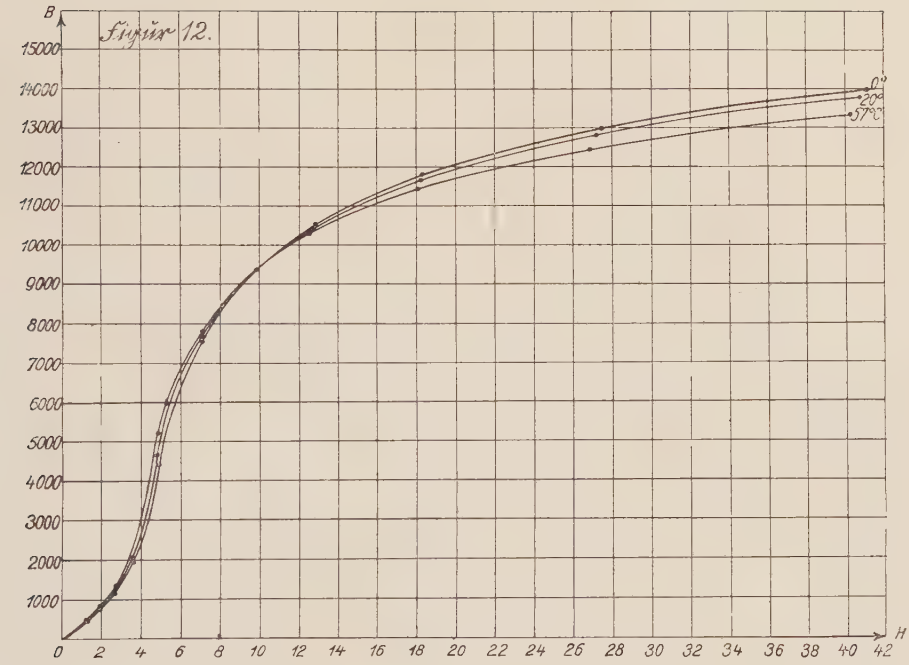

$-\Delta B$
Figur 7.
6
5
4
3
2
1
0 2 4 6 8 10 12 14 16 18 20 22 24 26 28 30 H
300 Atm.
300 Atm.
200 Atm.
100 Atm.

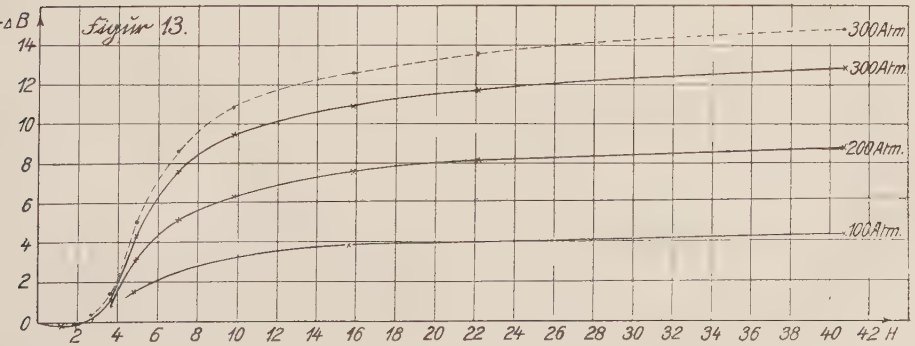

-ΔB
Figur 8.
4
3
2
1
0 2 4 6 8 10 12 14 16 18 20 22 24 26 28 30 32
H.
300 A/m.
300 A/m.
150 A/m.

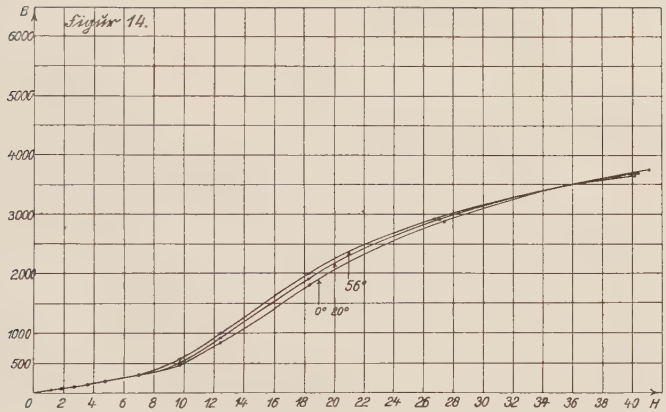

-ΔB
Figur 9.
1,5
1,0
0,5
12 14 16 18 20 22 24 26 28 30 32 H
300 A/m.
300 A/m.

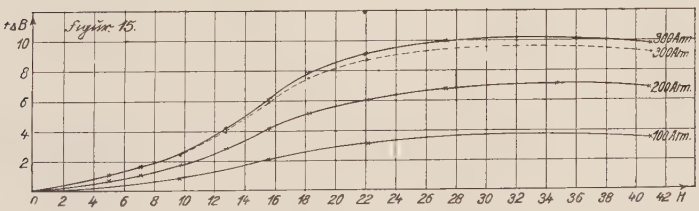

+ΔB
Figur 10.
1,5
1,0
0,5
0 2 4 6 8 10 12 14 16 18 20 22 24 26 28 30 32 34 36 38 40 H
300 A/m.
300 A/m.

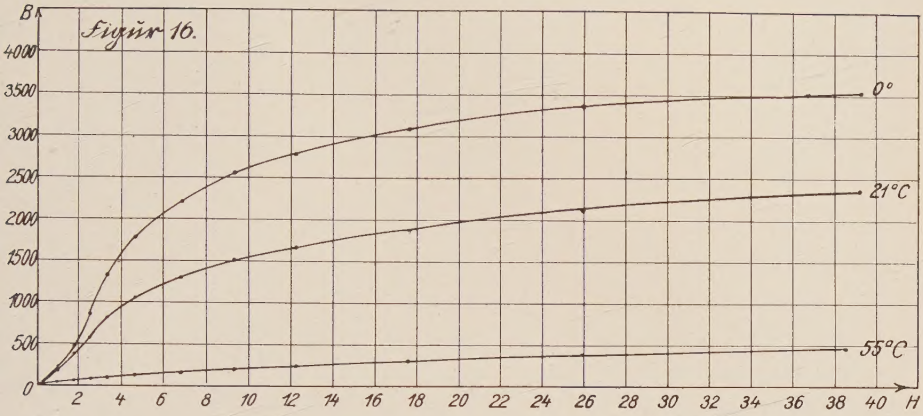

Figur 11.
B
14000
13000
12000
11000
10000
9000
8000
7000
6000
5000
4000
3000
2000
1000
0
2
4
6
8
10
12
14
16
18
20
22
24
26
28
30
32
34
36
38
40
42
H
42%
36%
30,20%
21%
26,84%

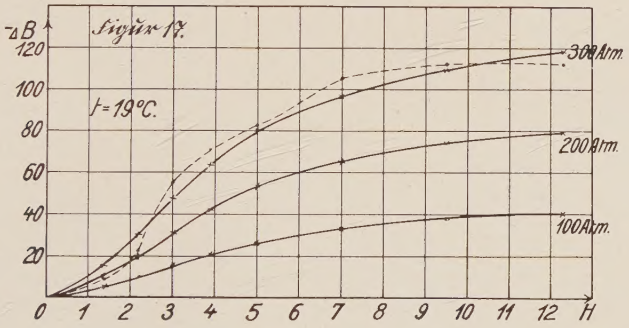

Figur 12.
B
15000
14000
13000
12000
11000
10000
9000
8000
7000
6000
5000
4000
3000
2000
1000
0 2 4 6 8 10 12 14 16 18 20 22 24 26 28 30 32 34 36 38 40 42
H
0°
20°
57°C

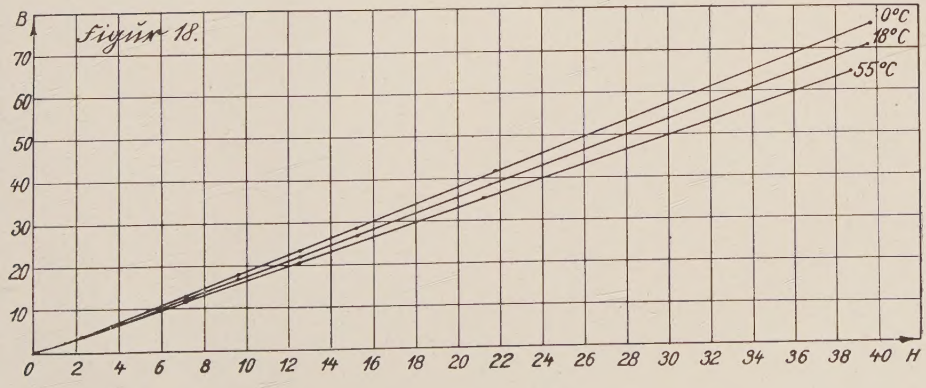

Figur 13.
ΔB
14
12
10
8
6
4
2
0
2 4 6 8 10 12 14 16 18 20 22 24 26 28 30 32 34 36 38 40 42 H
300Atm
300Atm.
200Atm.
100Atm.


Figur 14.
B
6000
5000
4000
3000
2000
1000
500
0
2
4
6
8
10
12
14
16
18
20
22
24
26
28
30
32
34
36
38
40
H
56°
0° 20°


Figur 15.
+ΔB
10
8
6
4
2
0
2
4
6
8
10
12
14
16
18
20
22
24
26
28
30
32
34
36
38
40
42
H
300 Atm.
300 Atm.
200 Atm.
100 Atm.


Figür 16.
B
4000
3500
3000
2500
2000
1500
1000
500
0
2 4 6 8 10 12 14 16 18 20 22 24 26 28 30 32 34 36 38 40 H
0°
21°C
55°C


Figür 17.
-ΔB
120
100
80
60
40
20
0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 H
t=19°C.
300A/m.
200A/m.
100A/m.


Figür 18.
B
70
60
50
40
30
20
10
0 2 4 6 8 10 12 14 16 18 20 22 24 26 28 30 32 34 36 38 40 H
0°C
18°C
55°C

G. Schuh & Cie.
G. m. b. H.
München.